



TITLE:

フレッシュコンクリートの流動特性に関する基礎的研究(  
Dissertation\_全文)

AUTHOR(S):

水口, 裕之

---

CITATION:

水口, 裕之. フレッシュコンクリートの流動特性に関する基礎的研究. 京都大学, 1984, 工学博士

ISSUE DATE:

1984-07-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r5343>

RIGHT:

フレッシュコンクリートの流動特性  
に関する基礎的研究

1984年2月

水口裕之

# フレッシュコンクリートの流動特性 に関する基礎的研究

1984年2月

水口裕之

# フレッシュコンクリートの流動特性に関する基礎的研究

## 目 次

第1章 緒 論 .....	1
1.1 序 論 .....	1
1.2 本論文の概要 .....	2
参考文献 .....	2
第2章 フレッシュコンクリートのレオロジーに関する従来の研究 .....	5
2.1 概 説 .....	5
2.2 ワーカビリティ .....	5
2.3 フレッシュコンクリートの性質の測定法 .....	8
2.3.1 フレッシュコンクリートの性質の従来の試験法 .....	8
2.3.2 フレッシュコンクリートのレオロジー的性質の測定方法 .....	8
2.3.3 粘度計による研究 .....	9
2.3.4 直接せん断あるいは三軸圧縮試験による研究 .....	10
2.3.5 動的方法による研究 .....	10
2.4 フレッシュペーストのレオロジー的性質 .....	11
2.4.1 フレッシュペーストのコンシステンシー曲線 .....	11
2.4.2 フレッシュペーストの配合要因とレオロジー的性質との関係 .....	11
2.5 フレッシュモルタルおよびコンクリートのレオロジー的性質 .....	13
2.5.1 フレッシュモルタルおよびコンクリートのコンシステンシー曲線 .....	13
2.5.2 フレッシュモルタルの配合要因とレオロジー的性質との関係 .....	14
2.5.3 フレッシュコンクリートの配合要因とレオロジー的性質との関係 .....	14
2.6 経過時間および環境条件の影響 .....	15
2.7 結 語 .....	16
参考文献 .....	16
第3章 フレッシュコンクリートのレオロジー的性質の測定方法に関する研究 .....	21
3.1 概 説 .....	21
3.2 二重円筒型回転粘度計による測定方法の検討 .....	22
3.2.1 はじめに .....	22
3.2.2 二重円筒型回転粘度計の理論 .....	22
3.2.3 実験の方法 .....	24
3.2.4 実験結果およびその考察 .....	25
(1) コンシステンシー曲線 .....	25
(2) 端末効果の検討 .....	26



(3) 壁効果の検討 .....	26
3.2.5 まとめ .....	27
3.3 球ひきあげ粘度計による測定方法の検討 .....	28
3.3.1 はじめに .....	28
3.3.2 実験の方法 .....	28
3.3.3 実験結果およびその考察 .....	29
(1) 経過時間の影響 .....	29
(2) フレッシュペーストおよびモルタルをニュートン流体と仮定 することの適否 .....	30
3.3.4 球ひきあげ粘度計のビンガム物体への通用 .....	30
(1) ビンガム物体中をゆっくり運動する球の受ける抵抗力 .....	30
(2) ビンガム物体のレオロジー定数の測定 .....	31
3.3.5 まとめ .....	32
3.4 平行板プラストメータによる測定方法の検討 .....	33
3.4.1 はじめに .....	33
3.4.2 平行板プラストメータの理論 .....	33
3.4.3 実験の方法 .....	36
3.4.4 実験結果およびその考察 .....	38
(1) コンシステンシー曲線 .....	38
(2) 球ひきあげ粘度計による測定値との比較 .....	38
(3) 載荷荷重の大きさによる影響 .....	39
(4) 試料高さの影響 .....	40
(5) レオロジー定数の測定値の再現性 .....	41
(6) 平行板プラストメータの適用性 .....	41
3.4.5 まとめ .....	42
3.5 Raised Cosine Pulse 法による測定方法の検討 .....	42
3.5.1 はじめに .....	42
3.5.2 Raised Cosine Pulse 法の測定理論 .....	43
3.5.3 実験の方法 .....	44
3.5.4 実験結果およびその考察 .....	46
(1) 試料容器壁面の粗度の影響 .....	46
(2) R.C.P.周波数の影響 .....	48
(3) R.C.P.振幅角の影響 .....	49
3.5.5 まとめ .....	50
3.6 結 語 .....	50
参考文献 .....	51
第4章 フレッシュコンクリートのレオロジー構成式に関する研究 .....	55
4.1. 概 説 .....	55
4.2. フレッシュペーストのレオロジー構成式の検討 .....	57

4.2.1	まえがき	57
4.2.2	実験計画および実験の方法	57
4.2.3	実験結果およびその考察	59
(1)	はじめに	59
(2)	球ひきあげ粘度計によるもの	59
(3)	回転粘度計によるもの	61
(4)	平行板プラストメータによるもの	61
4.2.4	まとめ	61
4.3	フレッシュモルタルのレオロジー構成式の検討	62
4.3.1	まえがき	62
4.3.2	実験計画および実験の方法	62
4.3.3	実験結果およびその考察	69
(1)	はじめに	69
(2)	セメントの体積濃度および細骨材量とレオロジー定数との関係	69
(3)	細骨材粒度とレオロジー定数との関係	70
(4)	固体粒子体積濃度とレオロジー定数との関係	70
(5)	フレッシュモルタルの性質に及ぼす細骨材の量および粒度の影響を表すパラメータ	72
(6)	みかけの細骨材体積濃度とレオロジー定数との関係	75
(7)	フレッシュモルタルのレオロジー構成式	80
(8)	フレッシュモルタルの降伏値と塑性粘度との関係	84
(9)	スランプ値、フロー値およびV B値とレオロジー定数との関係	85
4.3.4	まとめ	86
4.4	フレッシュコンクリートのレオロジー構成式の検討	87
4.4.1	まえがき	87
4.4.2	実験計画および実験の方法	87
4.4.3	実験結果およびその考察	95
(1)	はじめに	95
(2)	コンクリートの配合要因とレオロジー定数との関係	95
(3)	粗骨材粒形とレオロジー定数との関係	97
(4)	粗骨材粒度とレオロジー定数との関係	100
(5)	モルタルの性質がレオロジー構成式に及ぼす影響	102
(6)	モルタルの性質が異なる場合のレオロジー構成式の検討	103
(7)	フレッシュコンクリートの降伏値と塑性粘度との関係	107
4.4.4	まとめ	107
4.5	結 語	108
	参考文献	109

第5章 フレッシュコンクリートのレオロジー的性質に及ぼす経過時間の影響	
に関する研究	113
5.1. 概 説	113
5.2. 実験計画および実験の方法	114
5.2.1. 実験計画	114
5.2.2. 実験の方法	115
5.3. プレーンおよび混和剤を用いたコンクリートに関する実験結果および その考察	117
5.3.1. はじめに	117
5.3.2. プレーンコンクリートのアジテーション時間によるスランプ値の 変化	117
5.3.3. プレーンコンクリートのアジテーション時間によるレオロジー定 数の変化	118
5.3.4. 混和剤を用いたコンクリートのアジテーション時間によるスラン プ値の変化	119
5.3.5. 混和剤を用いたコンクリートのアジテーション時間によるレオロ ジー定数の変化	120
5.3.6. アジテーションを行ったコンクリート降伏値と塑性粘度との関係	120
5.4. スランプロス低減剤を用いたコンクリートに関する実験結果および その考察	121
5.4.1. はじめに	121
5.4.2. アジテーション時間とスランプ値との関係	121
5.4.3. アジテーション時間とレオロジー定数との関係	122
5.5. 結 語	123
参考文献	124
第6章 スランプ試験に関するレオロジー的検討	127
6.1. 概 説	127
6.2. 実験によるスランプ試験の検討	128
6.2.1. まえがき	128
6.2.2. 実験の方法	128
6.2.3. 実験結果およびその考察	130
(1) スランプ試験におけるコンクリートの流動状況	130
(2) スランプしたコンクリートの形状のモデル化	132
(3) フレッシュコンクリートの単位体積質量	132
6.2.4. まとめ	133
6.3. 有限要素法によるスランプ試験の検討	134
6.3.1. まえがき	134
6.3.2. 有限要素法による解析方法	135
6.3.3. 解析結果およびその考察	139

(1) 要素分割数の影響 .....	139
(2) フレッシュコンクリートの単位容積質量の影響 .....	140
(3) ポアソン比の影響 .....	141
(4) 最大せん断応力度の作用方向 .....	141
(5) スランプ値と最大せん断応力度の最大値との関係 .....	143
6.3.4 まとめ .....	145
6.4 せん断応力度の最大値と降伏値との比較 .....	146
6.4.1 はじめに .....	146
6.4.2 実験計画および実験の方法.....	146
6.4.3 実験結果およびその考察 .....	147
6.5 結 語 .....	148
参考文献 .....	148
第7章 結 論 .....	151
謝 辞 .....	154



# 第1章 緒 論

## 1.1 序 論

人類は、生活環境を確保し向上させて行くために各種の土木・建築構造物を築造して来た。その材料として、古くは土や石や木に代表される天然産の材料を用いていたが、現在ではコンクリートと鋼とが構造主体材料として広く使われている。

現在のコンクリートは、1824年の Aspdin のポルトランドセメントの発明に始まり、種種の改良が成され、多くの特徴と長所を持つ材料となっている。しかし、コンクリートには大きく分けると4つの欠点があるといわれている。それは、(1) 硬化に時間がかかること (2) 乾燥によって収縮すること (3) 引張強度が小さいこと (4) 品質のばらつきが大きい ということである。

硬化に時間がかかるという欠点を解決しようとすることについては、古くから種種の方法<sup>1-1)</sup>が提案されて来た。実用化されたものとしては、セメントや混和材料の改善によるもの<sup>1-2)</sup>促進養生によるもの<sup>1-3,4)</sup>がある。別の観点からは、製品化ということもある。

乾燥収縮については、膨張材で補償する<sup>1-5)</sup>ことによって改善されている。

引張強度が小さいということに対しては、プレストレスを与えてみかけ上引張強度を大きくする方法や、十分とはいえないが繊維補強コンクリートとして引張強度を大きくする方法が行われている。もう1つの考え方としては、引張強度が小さいことによって生じやすいひびわれが発生しても実害がなければそれを問題としないあるいは発生を予想してそれを後処理するという考え方<sup>1-6)</sup>などがある。

最後の品質のばらつきについては、現実問題としてはある程度許され、それを予想した設計方法が採用されている。すなわち、材料強度など設計用の特性値を決定する際にそのばらつきを考慮し、さらに

供試体と構造物自体のコンクリートとの違い、その他の原因による局部的なばらつきをも考慮して処理されている。このように品質にばらつきがあることにより、コンクリート構造物は不経済な面を一部には含んでおり、品質のばらつきを少なくすることが望まれている。

また、良質の天然骨材の枯渇や省資源による新しい人工骨材や流動化剤など新材料の開発によるコンクリートの性質の大きな変化、経済性の追求や合理化のためコンクリートを製造する際の品質管理を一定の規準で行うための資料の必要性などによるフレッシュコンクリートの性質の適確な把握が一段と要望されている。

ところで、コンクリートの主原料であるセメントは、鋼と同様に工場で製造され十分に品質が保証されているが、建設材料として使用するのはコンクリートであってセメントではない。コンクリートの品質は、コンクリート用材料の品質やその配合とコンクリートの製造と打設技術とによって支配されている。すなわち、全く同じ材料を使用しても悪いコンクリートも良いコンクリートもできることになる。両者の差の原因は、どのようにコンクリートを製造するかという技術だけである。

それでは、良いコンクリートとはどのようなものだろうか。それは、2つの状態すなわちコンクリートが硬化した状態と、ミキサから運搬され型枠に打込まれ締固められて落ちつくまでのフレッシュな状態との双方で満足なものでなければならない。この硬化コンクリートの品質を左右するフレッシュな状態における品質の必要条件は、コンクリートのコンシステンシーが過度の努力を要することなく適当な方法で運搬・締固めができるようなものであることならびに用いられる運搬・打込み方法に対してコンクリートが分離をおこして均等性を欠くすなわちばらつきのある製品となることがないように十分な抵抗性を持っていることである。

このようなフレッシュコンクリートの施工に関連した主な性質は、ワーカビリティと呼ばれてきたが、ワーカビリティの概念は、複雑なこともあっていまだにあいまいなまま残されている。したがって、現状ではフレッシュコンクリートの性質が適確に理解また測定されておらず、構造物の形状・寸法、施工方法などに関連させた適切な品質のコンクリートを用いていないことが、ばらつきを生ずる1つの原因となっている。このため、フレッシュコンクリートの性質を物理的な意味を持った数値でもって定量的に表すことが要求されている。

本研究は、コンクリート施工の合理化、省力化を行うために必要なフレッシュコンクリートの性質を物理的な意味を持った指標で定量化し、構造物の形状・寸法や施工方法に関連して要求されるフレッシュコンクリートの品質を決定するための基礎的資料を得ようとするものである。

このために解明しなければならないフレッシュコンクリートの性質に関する問題点が多いが、まず第1に問題となるフレッシュコンクリートの性質の定量的測定方法を検討し、フレッシュコンクリートの性質に及ぼす材料の性質や配合などの内的要因および温度、経過時間などの外的要因の影響について調べる。さらに、現在最も広く用いられているフレッシュコンクリートのコンシステンシー測定方法であるスランプ試験のレオロジー的意義を検討する。

## 1.2 本論文の概要

本論文は、フレッシュコンクリートの性質の測定方法およびコンクリートの性質に影響を及ぼす要因に関して論じたもので7章から成っている。

まず、第2章は、フレッシュコンクリートのワーカビリティに対する著者の考え方を示し、フレッシュコンクリートのレオロジー的性質の測定方法、性質に及ぼす各種要因の影響に関する既往の研究のうち、直接本論文に関係するものについて概説し、本論文の糸口とする。

第3章は、フレッシュコンクリートのレオロジー的性質の測定方法について検討した研究について述べる。すなわち、フレッシュコンクリートの性質を物理的な意味を持った数値でもって表す測定方法について、フレッシュペースト、モルタルおよびコン

クリートをビンガム物体と仮定し、比較的軟らかい試料に適する二重円筒型回転粘度計、球ひきあげ粘度計および硬い試料に適する平行板プラストメータの3種の粘度計を取り上げ、その測定方法、測定精度および適用性について検討を加える。また、試料に与える外乱を少なくし、内部構造の破壊を極力小さくして測定でき、硬化過程などを調べることができる Raised Cosine Pulse 法による測定方法についても検討する。

第4章は、フレッシュコンクリートのレオロジー構成式を求めることを目的とする。フレッシュペースト、モルタルおよびコンクリートをビンガム物体と仮定し、第3章で検討した粘度計を用いて、ペーストはセメント粒子と水とから成る2相材料、モルタルはペーストと細骨材とから成る2相材料、コンクリートはモルタルと粗骨材とから成る2相材料などと考えて、その性質に及ぼす各相の特性と量との関係を実験的に求め、使用材料の特性および配合からフレッシュモルタルやコンクリートなどのレオロジー定数を求める式を提案する。

第5章では、ブレーンおよび混和剤を用いたフレッシュコンクリートの性質に及ぼす経過時間の影響について論じる。フレッシュコンクリートはビンガム物体と仮定し、アジテーションを行いレオロジー定数のアジテーション時間による変化について、コンクリート温度、配合、混和剤の使用量を変えて調べる。

第6章は、現在フレッシュコンクリートのコンシステンシー試験として最もよく用いられているスランプ試験について考察を加え、スランプ値のレオロジー的意義について検討する。

第7章は、第3章から第6章までで得られた結果を総括するとともに、今後の問題点について述べ、本論文の結論とする。

## 参考文献

- 1-1) 樋口；コンクリートの早期強度増進，コンクリート工学，Vol.14，No.2，1976，pp.1～11.
- 1-2) 近藤；セメント化学のシーズとニーズ，コンクリート工学，Vol.17，No.2，1979，pp.1～11.
- 1-3) 河野；コンクリートの硬化促進に関する RILEM 国際会議における諸論文の紹介(1)～(5)，コンクリートジャーナル，Vol.3，No.5～8，1965，Vol.4，

No. 1, 1966.

- 1-4) たとえば, 仕入, 地濃; PCパネル用ホットコンクリートの性質に関する二, 三の実験, セメントコンクリート, No.294, 1971, pp.24-30.

1-5) たとえば, 電気化学工業株式会社; デンカ CSA マニュアル.

- 1-6) 樋口; コンクリート工学における将来の展望, コンクリート工学, Vol.17, No. 8, 1979, pp. 1-5.

## 第2章 フレッシュコンクリートのレオロジーに関する従来の研究

### 2.1 概 説

硬化したコンクリートの品質は、練り混ぜるときの材料の品質や配合が同じであってもコンクリートの運搬や打設の方法、締固めの程度、養生方法などによって非常に異なる。そのなかで運搬や打設の方法、締固めの程度は、コンクリートの強度、耐久性などの主要な品質を支配するコンクリートの均一性やコンクリート中の残存空気量に大きな影響を及ぼす。また、コンクリートを運搬、打設、締固め、仕上げなどを行う際に必要な仕事量が少ないことも経済性の面から要求される。

すなわち、フレッシュコンクリートは、材料が分離することなく容易に運搬、打設、締固め、仕上げができるような性質を持っていることが必要である。従来この重要なフレッシュコンクリートの性質をワーカビリティという術語で表現している。したがって、所要の品質のコンクリートを経済的に得るためには、フレッシュコンクリートのワーカビリティを適確に定義し、定量的に表現することが必要である。これはまた、コンクリート工事やコンクリート製品工場において、品質管理を一定の規準で行うためにもとくに要求されている。

ところが、ワーカビリティについては、2.2 で後述するように種種の定義がなされ、定量化が試みられてきたが、まだその概念は確立されておらず、定量化されるに至っていない。それは、ワーカビリティという概念が、フレッシュコンクリート自身の性質のみを表したり、運搬・打込み・締固め方法、構造物の形状・寸法など施工条件によって要求される性質が異なるものまで含めて表そうとしたり、その使い方が一定となっていないことや、フレッシュコンクリート自身の性質が、物理的な意味を持った数値で測定されておらず施工条件と要求されるフレッシュコンクリートの性質とがこのような数値で結びつ

けられていないためである。

したがって、フレッシュコンクリートのワーカビリティを明らかにするためには、ワーカビリティの概念を明確に定義するとともに、コンクリート自身の性質を物理的な意味を持った数値で表し、施工条件によって要求される性質とを結びつける必要がある。

そこで、本章では、フレッシュコンクリートのワーカビリティについて既往の研究を基として考察を加え、本論文の内容に関連するフレッシュコンクリート自身の性質を物理的な意味を持った数値で表すことに関する研究すなわちフレッシュコンクリートの性質についてレオロジー的に行われた測定方法および配合要因、環境条件などの影響に関する従来の研究について述べる。

### 2.2 ワーカビリティ

フレッシュコンクリートのワーカビリティの定義としては、種種提案されているが、これを大別すると、

(1) 打込み等の作業のしやすさと、均等質なコンクリートを得るために材料分離に抵抗する程度を示すフレッシュコンクリートの性質 (JIS<sup>2-1)</sup> 土木学会<sup>2-2)</sup> ACI<sup>2-3)</sup> Powers<sup>2-4)</sup>)

(2) 作業性の難易 (JASS 5<sup>2-5)</sup>)

(3) コンクリートの物理的特性の相互作用や施工方法と関連した性質 (Uzomaka<sup>2-6)</sup> Tassios<sup>2-7)</sup>)

(4) フレッシュコンクリートを完全に締固めるのに必要な有効内部仕事量 (Glanvilleら<sup>2-8)</sup>)

(5) フレッシュコンクリートの可動性 (Newmann<sup>2-9)</sup> Ritchie<sup>2-10)</sup>)

(6) コンクリートが最小空隙量になるような性質 (Baron and Lesage<sup>2-11)</sup>)

となる。

(1)~(3)は、フレッシュコンクリート自身の性質と



施工条件とによってワーカビリティを定義したものであり、(4)～(6)は、フレッシュコンクリート自身の性質のみによってワーカビリティを定義しようとしたものである。

後者のグループのフレッシュコンクリート自身の性質のみをワーカビリティと定義しようとする考え方について、Neville<sup>2-12)</sup>は次のように述べている。

ワーカビリティを打込みやすさと分離に対する抵抗性を表す性質であると定義すると、マスコンクリートに適したワーカビリティは、薄い断面や施工しにくい断面あるいは鉄筋の多い断面には適したワーカビリティのコンクリートとはならない。すなわち、前述のワーカビリティの概念は、施工条件によって左右されるものであって、コンクリート自身の物理的性質を定義しているものではなく問題がある。したがって、特定の施工条件に関係なく、ワーカビリティをコンクリート自身の物理的性質として定義すべきであり、コンクリートを完全に締固めるのに必要な有効内部仕事量をワーカビリティと定義するGlanvilleらの提案<sup>2-8)</sup>を支持している。

また、Ritchie<sup>2-13)</sup>は、フレッシュコンクリートの性質を図2.1に示すように分類しており、ワーカビリティは、この3つの性質を別別に測定し、これらの性質によってワーカビリティを表すのがよいとしている。Tassios<sup>2-7)</sup>は、フレッシュコンクリートの性質をレオロジー的に表すため、種類のレオロジー量から凝集力 $C$ 、内部摩擦角 $\phi$ 、塑性粘度 $\eta_p$ および降伏ひずみ $\delta_u$ を選び、これらの因子とワーカビリティの基本因子である可動性、安定性および締固め性との関連を表2.1のように示しているが、その最適化の方法については、明確にしていない。

このように、フレッシュコンクリートの性質は、

フレッシュコンクリートを、

- (1) 連続体としての塑粘性体たとえばビンガム物体
  - (2) 粉体的性質を持ったモール・クロンの法則に従う物質
  - (3) エネルギー量で評価できる物質
- などと仮定し、それらの物性定数を用いて表すことができる。

ところが、図2.1に示したRitchie<sup>2-10)</sup>の3つの基本的性質は、フレッシュコンクリート自身の性質を表すものであるが、締固め性は、可動性と大きく関係し、締固め性と可動性とを別別の性質と考えることは不適当である。また、表2.1に示したTassios<sup>2-7)</sup>の考え方は、この(1)、(2)の両者を同一のコンクリートに対して組合せて評価しており、本来別別に評価すべきものを混在させており適切でない。施工条件から要求されるフレッシュコンクリートの物性定数も、必ずしも常にある値が最適というわけでもなく、施工条件と関連させて変える必要がある。

このように、適切なコンクリートの性質は、施工方法、構造物の形状、寸法などによって左右され、施工条件から要求される性質は、コンクリート自身の基本的性質をいくつか組合せて表すことができる。

また、施工条件に関係なくコンクリート自身の基本的性質を表す術語としてワーカビリティという用語を用いることは、JIS<sup>2-1)</sup>などに定義されているワーカビリティの概念を表す術語が新しく必要となることおよびワーカビリティの語源から不適当と考えられる。

したがって、フレッシュコンクリートのワーカビリティは、施工条件によって要求される性質がコンクリート自身の性質を組合せて表せるものとし、こ

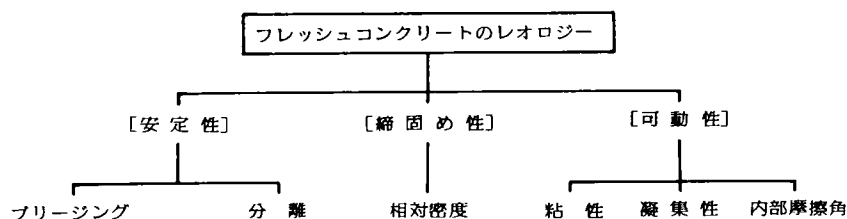


図2.1 Ritchieによるフレッシュコンクリートのレオロジー（ワーカビリティ）の概念<sup>2-13)</sup>

表2.1 Tassiosによるワーカビリチーの分析<sup>2-14)</sup>

信頼できない用語	実 用 的 性 質	望 ま し い 挙 動	望ましいレオロジー的性質
ワ ー カ ビ リ チ ー	流 動 性 (輸送および打込み時)	流れ始めの抵抗が小さい。	境界層において降伏値 $\tau_u$ が小さい。
		流動中の抵抗が小さい。	境界層において降伏値 $\tau_u$ 、塑粘性係数 $\eta^*$ が小さい。
		分離しないで移動する。	降伏ひずみ $\delta_u$ が大きい。
	安 定 性 (運搬および作業中の均等性)	保水性（ブリーディングを生じさせない）	(表面張力が高い)
		粗い粒子の相対的移動に抵抗する力（材料分離を生じさせない）	降伏値 $\tau_u$ 、粘着力 $C$ が大きい。
	締 固 め 性 (締固めを完全にするために、内部および表面の抵抗を越える力)	粘着力および内部摩擦が小さい。	使用した締固め方法において、降伏値 $\tau_u$ が小さい。
		吸着、表面マサツが小さい。	
		粘着力のあるペーストが多い。	粘着力が大きい。

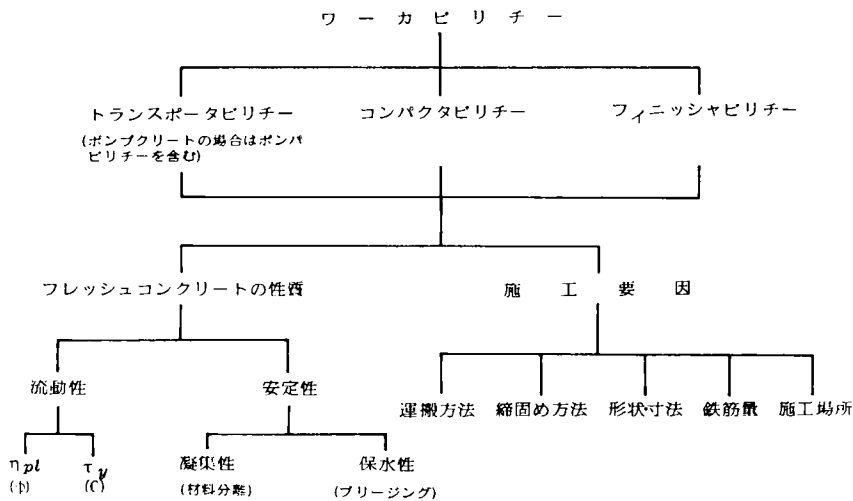


図2.2 著者のワーカビリチーの概念

れらを総合して表す概念と定義する。

そこで、コンクリート工事の施工工程を考え、ワーカビリチーを図2.2に示すように、ポンパビリチーを含む運搬性を表すトランスポータビリチー、締固め性を表すコンパクタビリチーおよび仕上げ性を表すフィニッシャビリチーの3つの性質で構成されているとする。これら3つの性質は、施工条件によって要求されるフレッシュコンクリート自身の性質

が異なることを含んでおり、図2.2に示すコンクリート自身の基本的性質の相互関係（組合せ）によって表されるとする。

フレッシュコンクリート自身の性質としては、図に示すように流動性と安定性とし、流動性は、フレッシュコンクリートをビンガム物体と考える場合には塑粘性粘度  $\eta_{pl}$  と降伏値  $\tau_y$  とで、粒状材料で土のような物質とみる場合には、粘着力  $C$  と内部摩擦角  $\phi$

とで表せるとする。安定性は、レオロジー的に評価できるフレッシュコンクリートの凝集性と、レオロジー的には評価することが困難であると考えられる保水性とで構成されたとする。

したがって、適当なワーカビリティのコンクリートは、施工条件に応じてフレッシュコンクリート自身のこれら4つの基本的性質を定量的に表す数値で表現できるとする。

## 2.3 フレッシュコンクリートの性質の測定法

### 2.3.1 フレッシュコンクリートの性質の従来の試験法

フレッシュコンクリートの性質とくにワーカビリティを測定するために多くの研究者によって種類の試験方法が提唱されてきた。その代表的測定方法には、次のようなものがある。<sup>2-14-19)</sup>

- (1) フレッシュコンクリートの安息角を測定する方法
- (2) シュートでの流下速度を測定する方法
- (3) 側圧の測定をする方法
- (4) トラフのオリフィスを用いる方法
- (5) フレッシュコンクリートを入れた型わくを上方に持ち上げたときに型わくに付着するコンクリート高さを測定する方法
- (6) フレッシュコンクリート中を通過させる鉄筋に作用する抵抗力を測定する方法
- (7) スランプ試験
- (8) フロー試験
- (9) 貫入試験（ケリーボール、DINの方法、イリバレン）
- (10) フレッシュコンクリート中からのコーンの引き上げ抵抗を測定する方法
- (11) 押し抜き抵抗試験
- (12) 落下試験
- (13) レモルジング試験
- (14) V B 試験
- (15) V F 試験
- (16) 締固め係数試験
- (17) Hallstromm の試験
- (18) Jean Faury の方法<sup>2-20)</sup>
- (19) ミキサ試験（スランプテスト<sup>2-21)</sup>

(20) Tattersall の Two-Point Test<sup>2-22)</sup>

(21) レオロジー定数測定法<sup>2-23)</sup>

(1)から(19)までの方法は、フレッシュコンクリートの性質のある側面を測定するもので、その面での定量化には成功している。しかし、その測定値の物理的意味は、不明確であったり未だ解析されておらず、フレッシュコンクリートの性質全体を測定するものとはいえないようである。

このため、フレッシュコンクリートの性質を物理的な意味を持った数値で定量的に評価しようとする1つの方法として、(20)および(21)のようなレオロジー的検討が行われるようになっている。

また、従来の試験方法のレオロジー的意義を検討したものとして、スランプ試験に関しては森永の実験的研究<sup>2-24)</sup> 村田らの理論的<sup>2-25,26)</sup> 研究があり、スランプ値は降伏値と密接な関係があることが報告されている。

### 2.3.2 フレッシュコンクリートのレオロジー的性質の測定方法

フレッシュコンクリートの性質のレオロジー的研究としては、<sup>2-27)</sup>

(1) フレッシュコンクリートを流体やビンガム物体と仮定して、そのレオロジー定数によって評価する方法

(2) 三軸圧縮試験あるいは直接せん断試験から求まる内部摩擦角および粘着力を用いる方法

(3) フレッシュコンクリートに動的な外力を与えて波動の伝播特性やその応答から求まる動的特性値を用いる方法

の3つに分類される。

(1)のフレッシュペースト・モルタル・コンクリートを何らかのレオロジーモデルに仮定し、そのレオロジー量や流動性状を測定する方法としては、(i) 回転粘度計、<sup>2-28-36)</sup> (ii) 落球型粘度計、<sup>2-37-40)</sup> (iii) 平行板プラストメータ、<sup>2-40,42)</sup> (iv) 毛細管型粘度計<sup>2-30,43-45)</sup> が使用されている。

(2)の方法は、従来土材料に対して用いられていた方法をフレッシュコンクリートに適用したもので、フレッシュコンクリートを粉体構造をもつものとして検討するものであり、比較的硬いコンクリートの性質を測定するのに適しているといわれている。(3)の方法は、(1)および(2)の静的測定方法に対して動的

測定方法と呼ばれ、(i) 波動の伝播速度による方法<sup>2-50)</sup> (ii) 波動の減衰状況を測定する方法<sup>2-51-53)</sup> (iii) 共振法による方法<sup>2-54)</sup> (iv) ねじり変形による方法<sup>2-55-59)</sup> などがある。

### 2.3.3 粘度計による研究

前述したように、フレッシュペーストやコンクリートを流体やビンガム物体と仮定して測定する粘度計としては、回転粘度計、平行板プラストメータ、落球型粘度計、毛細管型粘度計などが用いられている。

#### (1) 回転粘度計による研究

セメントを用いた材料の物性測定に回転粘度計を用いた研究としては、1955年 Tattersall<sup>2-28,29)</sup> が定常せん断下でのセメントペーストの内部構造の破壊について調べヒステリシスループが描かれることを報告している。その後 Papadakis<sup>2-60)</sup> Ish-Shalom と Greenberg<sup>2-33)</sup> Uzomaka<sup>2-61)</sup> Asaga と Roy<sup>2-62)</sup> 菊川<sup>2-63)</sup> 梅屋ら<sup>2-64)</sup> Otsuboら<sup>2-65)</sup> がセメントペーストを対象として研究しており、フレッシュペーストは、図2.3 に示すような降伏値と塑性粘度との2つのレオロジー定数で記述できるビンガム物体にほぼ近似できることを示し、セメントの体積濃度とレオロジー定数との関係式を求めている。

モルタルやコンクリートに対しては、外円筒半径11.5~15cm、円筒間隔2.3~5cm程度の回転粘度計を用いた村田ら<sup>2-35,66)</sup> 西林ら<sup>2-34,67)</sup> Uzomaka<sup>2-61)</sup>

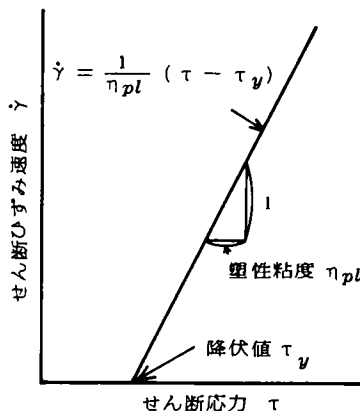


図2.3 ビンガム物体のコンシステンシー曲線

Wesche<sup>2-68)</sup> 長滝ら<sup>2-37)</sup>の研究があるが、粒子の最大寸法と同筒間隔との比率<sup>2-61)</sup>円筒間隔<sup>2-66)</sup>装置の大型化<sup>2-75)</sup>コンクリートではスランプ値15cm以上、モルタルではフロー値で200以上の軟らかい試料にしか適さない<sup>2-73,76)</sup>こと、チクソトロピー<sup>2-68,73)</sup>材料分離<sup>2-68,73)</sup>すべり層の発達<sup>2-37,66)</sup>などの問題点が指摘されている。

このすべり層については、ビンガム体と考えられる懸濁液ですで見出されており<sup>2-71)</sup>岩綿モルタルを対象として回転粘度計中では牟田<sup>2-72)</sup>が確認している。

村田ら<sup>2-66,69,70)</sup>は、回転粘度計におけるすべりを補正しないとレオロジー定数が不正確になるとし、粘度計中の試料表面に浮かした標点を用いた補正の方法を提案している。長滝ら<sup>2-37)</sup>の円棒状のうきを用いる方法もある。しかし、これらは測定方法が非常に複雑であり、現場での使用には適さない欠点がある。

チクソトロピーや材料分離の影響については、Tattersall<sup>2-73)</sup>や Wesche<sup>2-68)</sup>が研究しているが、Tattersall<sup>2-73)</sup>は、トルクの低下は、このチクソトロピーおよび沈殿のためであり、すべり層の存在については懐疑的である。

回転粘度計に類する実用的な方法として Tattersall<sup>2-22)</sup>は、すべりや材料分離の影響を考えなくてよいホバート型ミサの回転数とトルクとの関係からビンガム物体のレオロジー定数に関連するパラメータを求める方法を提案している。

#### (2) 平行板プラストメータによる研究

平行板プラストメータを用いたものとしては1939年 Roller<sup>2-77)</sup>が硬いフレッシュペーストのφ28×25mmの円柱状の試料を2枚の平行板間にはさみ、一定荷重をかけその変形性状を調べている。しかし、この方法は、レオロジー定数を求めるまでには到っていない。平行板プラストメータの測定理論については、ニュートン流体に対して、1946年 Diens-Klemm<sup>2-78)</sup>の式が発表されており、ビンガム物体に対しては、1931年 Scott<sup>2-79)</sup>が導いている<sup>2-80,81)</sup>。しかし、Scottの式は近似が大きく、その後岡と小川<sup>2-80,81)</sup>とが近似を少なくした理論式を発表している。

平行板プラストメータをフレッシュペーストやコンクリートに適用した例は、著者らの研究<sup>2-40)</sup>を除くとほとんどない。この装置は、試料が自立するこ



とやその流動速度が遅くなければならず比較的硬い試料に適するという特徴を有するが、円板状の試料の直径と高さの比が10以上<sup>2-80,81)</sup>という条件があり、大きな粒子を含むコンクリートでは装置が大型化するという欠点があるなどその適用性には実用上限界がある。

#### (3) 落球型粘度計による研究

落球型粘度計をフレッシュコンクリートに始めて適用したのは、L'Hermite<sup>2-38)</sup>である。この場合は、振動を受けているコンクリートを対象としており、フレッシュコンクリートをニュートン流体と仮定している。明石ら<sup>2-39)</sup>も同様の仮定で、振動の影響について研究している。ビンガム物体と仮定した場合については、明石ら<sup>2-82)</sup>西林ら<sup>2-83)</sup>岸谷ら<sup>2-41)</sup>の研究がある。

この場合の測定基本式としては、降伏値によって流動範囲が限定されることを無視した著者らの近似式<sup>2-40)</sup>変分原理を用いて降伏値の影響を考慮して導いた吉岡らの近似解<sup>2-84)</sup>実験的に降伏値の影響を求めこれを用いた Ansleyの式<sup>2-85)</sup>がある。

落球型粘度計は、適当に球の引きあげ速度を変えてそのとき球に作用する抵抗力を測定し、これらからコンシステンシー曲線を描きレオロジー定数を求めるものである。この方法は、振動中のコンクリートにも適用できる利点を有するが、振動によって生ずると考えられる材料分離の影響をなくして測定することは困難である。

#### (4) 毛細管型粘度計による研究

大沢<sup>2-44)</sup>は、メーソンリーセメントペーストを対象として、毛細管型粘度計を用いてチクソトロピーを示す非ニュートン流体状の流動曲線を求めている。また、鈴木ら<sup>2-86-89)</sup>は、管径20mm、管長100cmのステンレス管を5～15°傾けた場合のモルタルの実測流量とビンガム物体に対する Buckingham-Reiner式による流量とが一致することから、降伏値および塑性粘度が求められると報告している。

#### (5) その他の装置による研究

村田ら<sup>2-90)</sup>は、斜面上にモルタルやコンクリートを置き、その傾斜角を大きくして行き、試料が連続的にすべるときの角度を測定し、これを用いて降伏値を求め、ばらつきのないよい測定法であると述べている。

### 2.3.4 直接せん断あるいは三軸圧縮試験による研究

フレッシュコンクリートを内部摩擦角 $\phi$ と粘着力Cを持った材料と考えて、L'Hermiteら<sup>2-91)</sup>は、円環状の回転型一面せん断試験によって、直応力とせん断応力との関係を測定し、内部摩擦角と粘着力とを求めている。

Ritchie<sup>2-92)</sup>は、フレッシュコンクリートの凝集力を調べるため、Hallström<sup>2-92)</sup>によって提案された方法を改良した直接引張試験を行い、コンクリートの配合と0.62～0.05kPaの範囲の凝集力との関係を求め、この値が小さいと材料分離が生じやすいと述べている。

また、Ritchie<sup>2-10,94)</sup>は、 $\phi 10 \times 20$ cmのフレッシュコンクリートの供試体を用いて三軸圧縮試験を行い、モール・クーロンの法則に従うことを確かめ、粘着力と内部摩擦角を求めている。Tassios<sup>2-7)</sup>は、三軸圧縮試験におけるひずみ速度の影響について調べ、 $20.0 \times 10^{-3} \sim 1.2 \times 10^{-3} / \text{min}$ の範囲内では、せん断強度のばらつきは試験誤差内であったと報告している。

フレッシュコンクリートの三軸圧縮試験については、西林ら<sup>2-47,48)</sup>も研究を行い、骨材特性、配合、混和剤の影響について報告している。

松尾ら<sup>2-16)</sup>は、締固めたコンクリートに局部載荷を行い、その30cmの深さの位置での鉛直応力を測定し、それから内部摩擦角を求めている。また、プレートひきあげ抵抗からレオロジー量を求めようとした岡本<sup>2-95)</sup>の研究もある。

その他、セメントペースト中に埋め込んだ板でせん断変形を与えた Stolnikov<sup>2-96)</sup>の方法、Ukrainčik<sup>2-97)</sup>のコンクリートを変形可能なピン構造の箱に入れその上下面に平行な力を加えてせん断変形を与えて、その力と変形との関係からレオロジー定数や流動特性を求めたものもある。

### 2.3.5 動的方法による研究

試料に波動すなわち超音波や弾性波を与え、その伝播速度、共振点、減衰などを測定して、動的な弾性率や粘性率を測定する方法と、二重円筒型回転粘度計で微小な回転変形を連続あるいは1波与え、その応答トルクや減衰を測定することによって動的弾性率や粘性率を求める方法がある。

波動の伝播による方法としては、角田らの超音波パルスを用いたもの<sup>2-52)</sup> 共振法によるもの<sup>2-54)</sup> 単一弾性波の伝播性状によるもの<sup>2-98)</sup> とがある。これは、フレッシュモルタルやコンクリートの波動の伝播速度や減衰を求め、はりまたは細長い粘弾性体棒の振動と仮定して、動的粘弾性率を求めるものであり、動的弾性率として、10MPaオーダー、動的粘性率として、 $10^2 \sim 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ オーダーの値を報告している。そしてこの値は、セメントペーストではセメントの濃度、モルタルでは細骨材量が増加すると大きくなり、経過時間が長くなると、これらの値は増加し、モルタルやコンクリートの経時変化を測定するよい方法であると述べている。

また、微小回転変形を用いる方法(R.C.P.法、3.6参照)は、磯田ら<sup>2-100)</sup> の開発によるもので、大きな外乱を与えることなくすなわち構造破壊を生じさせることなく物性を測定できるもので経時変化などを測定できる特徴を持っている。玉井ら<sup>2-59,101-103)</sup> は、この方法を用いて応答トルクの形を求め、経過時間が長くなると、フレッシュペーストは粘弾性体から、弾性体に近づいて行くことを報告している。梅屋<sup>2-104)</sup> も同様の装置を用いてリサージュ図形や応答トルクを測定し、フレッシュペーストは塑性体から粘弾性体となり、最終的に弾性体へと時間とともに変化することを示しているが、動的な粘弾性率は測定していない。

また、振動式回転粘度計を用いたものとしては、Powers<sup>2-56)</sup> Bergström<sup>2-55)</sup> 角田ら<sup>2-57,58)</sup> の研究がありBergström<sup>2-55)</sup> は、コンクリートの締固めに適する配合についてねじり振動の減衰状況から判断し、角田ら<sup>2-25,58)</sup> は、リサージュ図形を求め、動的弾性率はペーストおよびモルタルで、数10Pa、動的粘性率は数Pa・sであると報告している。

## 2.4 フレッシュペーストのレオロジー的性質

### 2.4.1 フレッシュペーストのコンシステンシー曲線

1955年 Tattersall<sup>2-28,29)</sup> は、回転粘度計を用いてフレッシュセメントペーストの流動曲線がヒステリシスループを描くことを報告しており、これはセメント粒子の構造がせん断によって破壊するためで

あると説明している。

Clark<sup>2-105)</sup> は、回転粘度計で図2.4を求め、水セメント比が1以上では、ニュートン流体、1未満ではビンガム物体に近いことを示している。Papadakis<sup>2-106)</sup> は、セメントペーストをビンガム物体と仮定できると述べている。

その後、Ish-shalomら<sup>2-107)</sup> は、回転粘度計を用いて図2.5を得、ペーストは非ビンガム物体であることを示している。また、この図のようにペーストがチクソトロピーを示すことは、Lapasin<sup>2-108,109)</sup> ら多くの研究者が報告している。

一方、西林ら<sup>2-67)</sup> は、回転粘度計によるとペーストはビンガム流動を示すと述べている。

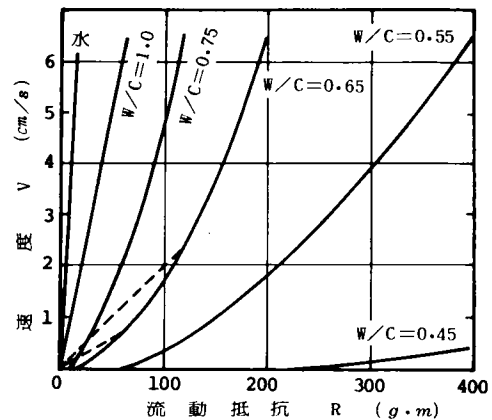


図2.4 Clark によるセメントペーストの流動曲線<sup>2-105)</sup>

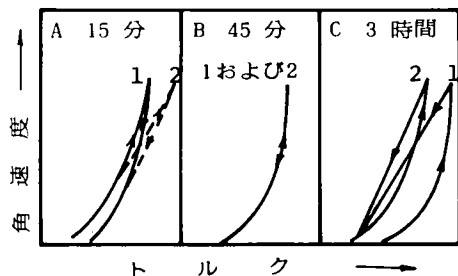


図2.5 Ish-Shalom によるセメントペーストの流動曲線<sup>2-107)</sup>

### 2.4.2 フレッシュペーストの配合要因とレオロジー的性質との関係

サスペンションのレオロジー的特性は、主に粒子間力によって変化することが知られており<sup>2-110)</sup> セ

メントペーストのレオロジー的特性は、配合、練り混ぜ方法、練り混ぜ後の経過時間、セメントの種類など多くの要因によって変化する。<sup>2-111)</sup>

経過時間の影響について、Powers<sup>2-111)</sup>は水とセメントとが接触したすぐ後の短期間の急速な反応に続く発熱の割合の減少する一般には40～120分の期間すなわち休眠期間を超えないならば、この影響は大きくないと述べており、その1例が Ish-Shalom<sup>2-112)</sup>らによって示されている。

### (1) セメントの濃度

セメントの濃度が高くなるとセメントペーストの降伏値および塑性粘度が大きくなることは、いくつか報告されており、ペーストをビンガム物体と仮定したとき、回転粘度計を用いた Papadakis や Ish-Shalom<sup>2-108)</sup> による図2.6や次のような関係式が発表されている。

Papadakis および Ish-Shalom と Greenberg<sup>2-33)</sup>

$$\left. \begin{aligned} \tau_y &= C \exp \left( K_1 \frac{v_c}{v_w} \right) \\ \eta_{pl} &= \eta_0 \exp \left( K_2 \frac{v_c}{v_w} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

Uzomaka<sup>2-61)</sup>

$$\left. \begin{aligned} \tau_y &= A \exp \left( -K_1 \frac{v_w}{v_c} \right) \\ \eta_{pl} &= B \exp \left( -K_2 \frac{v_w}{v_c} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

Asaga と Roy<sup>2-62)</sup>

$$\left. \begin{aligned} \tau_y &= A \alpha^{(v_c-0.5)} \\ \eta_{pl} &= B \exp (K_1 v_c + K_2) \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

村田ら<sup>2-115)</sup>

$$\eta_{re} = \left( 1 - \frac{v_c}{v} \right) (-K_1 v_c + K_2) \quad (2.4)$$

角田ら<sup>2-116)</sup>

$$\eta_{re} = 1 + \frac{3}{\frac{1}{v'} - \frac{1}{v_o'}} \quad (2.5)$$

ここで、 $\tau_y$  は降伏値、 $\eta_{pl}$  は塑性粘度、 $\eta_{re}$  は相対粘度、 $v_c$  はセメントの体積濃度、 $v_w$  は水の体積濃度、 $v$  はセメントの最高体積濃度、 $v'$  はセメント集合体粒子の体積濃度、 $v_o'$  はセメント集合体粒子

の最高体積濃度、 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $A$ 、 $B$ 、 $C$  および  $\alpha$  は実験定数、 $\eta_0$  は水の粘性係数である。

このように表し方やその値は研究者によって異なっているが、降伏値、塑性粘度ともに、セメント濃度が増加すると指数関係的に増大することが示されている。村田ら、<sup>2-115)</sup> 角田ら、<sup>2-116)</sup> は、セメント粒子がいくらか集まって一魂となった集合粒子の概念を使用している。

Wesche<sup>2-68)</sup> は、二重円筒回転粘度計の円筒間の間隔を小さくした場合には、同じペーストに対して降伏値はほぼ同じであるが、塑性粘度は大きく測定されると述べている。

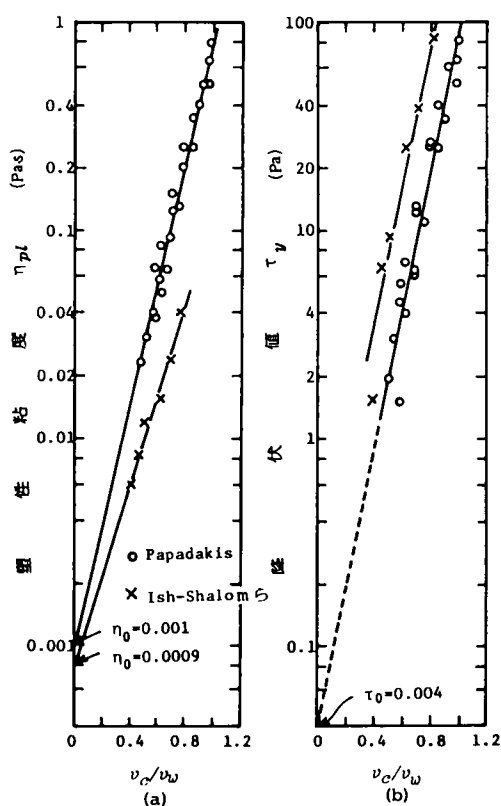


図2.6 フレッシュペーストの塑性粘度および降伏値<sup>2-108)</sup>

### (2) セメント粒子の寸法、形状などの影響

セメント粒子の寸法や形状などの影響についての研究は少ないが、菊川<sup>2-117)</sup> は、粉末度の小さい方が同じ濃度でも塑性粘度は大きいと報告している。

### (3) 化学混和剤の影響

化学混和剤は、セメントペーストの性質に大きく影響し、その種類、使用量、添加方法などによって大きく変化する。

Bruere<sup>2-118)</sup>は、図2.7を示しており、混和剤の使用量によってみかけの粘度が変化し、それは混和剤の種類によって、大きくなるものや小さくなるものがあることを報告している。

Papadakis<sup>2-118)</sup>は、非空気連行性の可塑性では、塑性粘度はわずかに減少させるだけであるが、降伏値を大きく減少させると述べている。

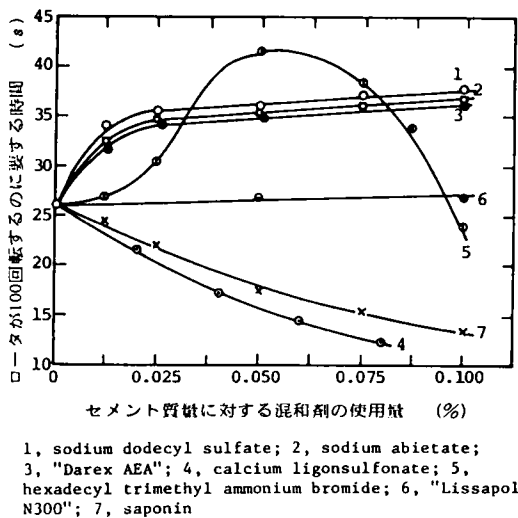


図2.7 混和剤の使用量がみかけの粘性に及ぼす影響<sup>2-118)</sup>

#### (4) 連行空気量の影響

連行空気は、ペーストのスティフネスを増加させる<sup>2-119)</sup>が、Bruere<sup>2-118)</sup>は、同軸回転粘度計を用いて、空気を連行させることによってみかけの粘性が増加することを得ている。

## 2.5 フレッシュモルタルおよびコンクリートのレオロジー的性質

### 2.5.1 フレッシュモルタルおよびコンクリートのコンシステンシー曲線

フレッシュモルタルのコンシステンシー曲線について、1960年木村ら<sup>2-30)</sup>は、ストーマー型粘度計および毛細管型粘度計を用いて、図2.5と同様の結果を報告しており、せん断ひずみ速度の小さいところ

では、せん断応力軸に対して凸の曲線となっているが、近似的にはビンガム物体と仮定できると述べている。1961年大沢<sup>2-44)</sup>は、毛細管型粘度計を用いて同様の結果を報告している。Legrand<sup>2-120,121)</sup>もモルタルについて、固体粒子の体積濃度が約0.6以下であればビンガム物体であり、それよりも大きければ、せん断応力軸に対して凹な曲線となることを報告している。

西林ら<sup>2-67)</sup>は、回転粘度計で図2.8に示すようなコンシステンシー曲線を得ており、フレッシュモルタルは、ビンガム物体に近似できるとしている。

フレッシュコンクリートについては、ベーンセン断試験器を用いて、鳥田ら<sup>2-122)</sup>が図2.9を得ビンガム物体に近似できると報告している。村田ら<sup>2-35)</sup>は、回転粘度計でコンクリートがビンガム物体に近似できることを示している。

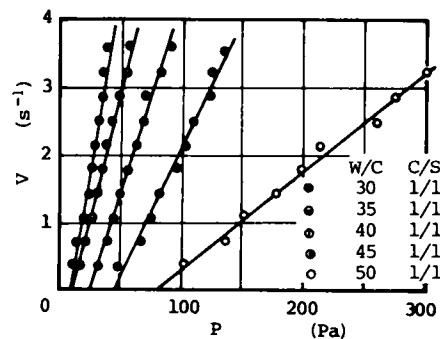


図2.8 配合の異なるモルタルのコンシステンシー曲線<sup>2-34)</sup>

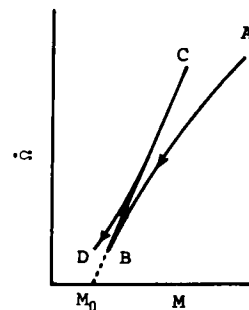


図2.9 ベーンセン断試験器によるフレッシュコンクリートの流動曲線<sup>2-122)</sup>

## 2.5.2 フレッシュモルタルの配合要因とレオロジ的性質との関係

1971年西林ら<sup>2-34)</sup>は、回転粘度計を用いてモルタルの配合とレオロジー定数との関係について研究し、図2.8に示すような結果を報告し、水セメント比が大きくなると塑性粘度、降伏値ともに小さくなると述べている。また、塑性粘度が最大を示す細骨材量があり、値は異なるが降伏値が最小になる細骨材量があることを報告<sup>2-67)</sup>している。

Legrand<sup>2-121)</sup>は、モルタルの固体粒子の濃度と降伏値の対数とは直線関係になると述べている。菊川ら<sup>2-123)</sup>は、フレッシュモルタルをペーストと細骨材とから成る2相材料と考え、細骨材の体積濃度 $v_s$ と相対粘度 $\eta_{re}$ とは、

$$\eta_{re} = \frac{\eta}{\sqrt{\eta_0}} = \left(1 - \frac{1}{V} v_s\right)^{-K} \quad (2.6)$$

ここで、 $\eta_0$ はセメントペーストの塑性粘度、 $\eta$ はフレッシュモルタルの塑性粘度、 $V$ は細骨材の実積率、 $K$ はサスペンション粒子の形状に関する定数である関係式を発表している。

角田ら<sup>2-124)</sup>は、高濃度サスペンションに対する森・乙竹の式<sup>2-125)</sup>を用いて、フレッシュモルタルの相対粘度 $\eta_{re}$ は、

$$\eta_{re} = 1 + \frac{3}{\frac{1}{v_s} - \frac{1}{v_{so}}} \quad (2.7)$$

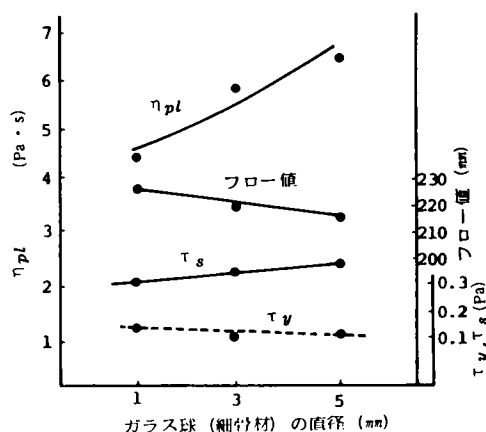


図2.10 モルタルの細骨材粒子の寸法とレオロジー定数との関係<sup>2-126)</sup>

ここで、 $v_s$ ；細骨材の体積濃度、 $v_{so}$ ；細骨材の最密充填のときの体積濃度で表せるとしている。また、 $v_{so}$ は、細骨材の濃度によって変化すると指摘している。

細骨材の粒度や粒径を変化させたものとしては、菊川<sup>2-123)</sup>が豊浦標準砂と川砂を用いて、西林ら<sup>2-34)</sup>が豊浦標準砂、川砂、人工軽量骨材を用いて測定し、粒度や粒径によってレオロジー定数が変化すると述べている。

また、村田<sup>2-126)</sup>は、モデル骨材としてガラス球を用いて、同一濃度でも球が大きくなると塑性粘度は増加し、降伏値は減少する図2.10を示している。

混和剤の影響については、西林<sup>2-127)</sup>らがAE剤および減水剤を用いた場合、ブレンモルタルに比べて、同一スランプで、塑性粘度は1.5～3倍となるが、降伏値は大差ないとし、ペーストに対するPapadakis<sup>2-118)</sup>の結果と逆の傾向を報告している。

また、西林ら<sup>2-127)</sup>は、水セメント比の大小によって混和剤の影響が異なる場合があると述べている。

このように、フレッシュモルタルのレオロジー定数に及ぼす細骨材の量、粒度、粒形などの影響についての研究は多くなく、今後定量的な検討が必要である。

## 2.5.3 フレッシュコンクリートの配合要因とレオロジ的性質との関係

フレッシュコンクリートの配合要因とレオロジ的性質との関係について、村田<sup>2-76,126,128)</sup>は、水セメント比を変えたときの塑性粘度や降伏値の変化を求めており、細骨材率が一定で、単位セメント量あるいは単位水量を一定として水セメント比を増加させると、塑性粘度、降伏値ともに小さくなると報告している。

菊川<sup>2-123)</sup>は、フレッシュコンクリートをモルタルと粗骨材とから成る2相材料と考えてその相対粘度 $\eta_{re}$ を、

$$\eta_{re} = \frac{\eta}{\sqrt{\eta_0}} = \left(1 - \frac{1}{V} v_g\right)^{k_1 v_g k_2} \quad (2.8)$$

ここで、 $v_g$ は粗骨材の体積濃度、 $V$ は粗骨材の実積率、 $k_1$ および $k_2$ は実験定数で与えている。

Hobbs<sup>2-129)</sup>は、セメントペーストをニュートン流体あるいはビンガム物体に近似し、骨材の体積濃度が高くなると連続相の速度勾配が大きくなること

から、理論的にフレッシュコンクリートの粘度 $\eta_c$ は、<sup>2-10)</sup> 藤田ら<sup>2-132)</sup>はRitchieの結果と比較して表2.2を示している。

$$\eta_c = \eta_p \left[ 1 + \frac{V_a f(u_a)}{1 - u_a} \right] \quad (2.9)$$

ここで、 $\eta_p$  はセメントペーストの粘度、 $u_a$  は骨材の濃度、 $f(u_a)$  は  $\frac{\tau_a}{\tau_p} = \frac{\text{骨材の平均せん断応力}}{\text{ペーストの平均せん断応力}}$  による実験定数で表せることを導いている。

また、Hobbs<sup>2-129)</sup>は、骨材粒度の違いによってコンシステンシー曲線すなわちレオロジー定数も変化することを報告しており、平均せん断応力の増加分を表す式を与えている。そして、これによって求めた塑性粘度は、水セメント比0.65の場合 Murata<sup>2-130)</sup>らの結果と一致していると述べ次式を示している。

$$\begin{aligned} \tau_c &= \tau_{op} \left[ 1 + \frac{1.5 u_{a1 \max} u_a + u_a^2}{u_{a1 \max} - u_a} \right] \\ &+ \eta_p \left[ 1 + \frac{2.5 u_{a1 \max} u_a}{(1 - u_a)(u_{a1 \max} - u_a)} \right] \dot{\gamma}_c \\ &= \tau_{oc} + \eta_c \dot{\gamma}_c \end{aligned} \quad (2.10)$$

ここで、 $\tau_c$  はコンクリートの平均せん断応力、 $\tau_{op}$  はセメントペーストの降伏値、 $u_a$  は骨材体積濃度、 $u_{a1 \max}$  は骨材粒子を密に詰め込んだ時の骨材体積濃度、 $\eta_p$  はセメントペーストの塑性粘度、 $\dot{\gamma}_c$  はコンクリートのせん断速度、 $\tau_{oc}$  はコンクリートの降伏値、 $\eta_c$  はコンクリートの塑性粘度である。

また、Kaplan<sup>2-131)</sup>は、骨材の角ばりの程度がフレッシュコンクリートの性質に及ぼす影響について調べ、角ばった骨材を用いるとコンシステンシーが低下すると述べている。

その他、フレッシュコンクリートの性質をRitchie<sup>2-10)</sup>、菊川、<sup>2-123)</sup> 西林ら<sup>2-47,48,132)</sup>は三軸圧縮試

## 2.6 経過時間および環境条件の影響

コンクリートの材料や配合が同じであっても、水

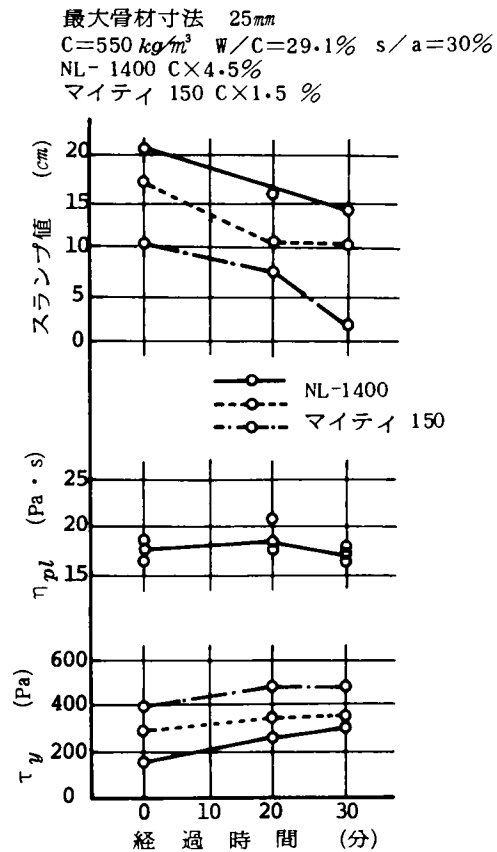


図2.11 コンクリートの塑性粘度、降伏値およびスランプの経時変化<sup>2-126)</sup>

表2.2 三軸圧縮試験によるフレッシュコンクリートの性質に及ぼす影響<sup>2-132)</sup>

レオロジー量	影響因子			藤田らの研究		Ritchieの研究	
φ	W	↗		下がる傾向	↘	下がる傾向	↘
	s/a	↗		最小にするs/aがある	↘	骨材量増加とともに大	↗
	C	↗		下がる傾向	↘	上がる傾向	↗
τ <sub>0</sub>	W	↗		下がる傾向	↘	下がる傾向	↘
	s/a	↗		最大にするs/aがある	↘	骨材量増加とともに大	↗
	C	↗		最大にするCがある	↘	上がる傾向	↗

とセメントを練り混ぜてからの経過時間によって、コンクリートの性質が変化することは、よく知られている。

これについてレオロジー的に研究したものは少ないが、村田<sup>2-126)</sup>は、図2.11のように30分程度までは塑性粘度は、ほとんど変化せず、降伏値のみが増加するとしている。これは、水和が活発に行われていない(溶媒和がおこってなく、粒子間結合がない)範囲では塑性粘度は変化しないが、軽微な水和により若干のゲルが形成されて粒子間摩擦が変化し降伏値は増大するためだと説明している。

温度の影響について、村田<sup>2-126)</sup>は、10~30℃の範囲では、モルタルの降伏値、塑性粘度はともに1例を除いて増加すること、塑性粘度に及ぼす温度の影響はモルタルの配合の貧富によって相違することを示している。これは、水和による粘度増加と水の温度上昇による粘度低下との相乗効果によると報告している。

なお、湿度や振動など外的環境条件の影響については、明確にされていないようである。

## 2.7 結 語

以上述べてきたように良い品質のコンクリートを経済的に得るためには、フレッシュコンクリートの性質を定量的に表し、これと施工条件によって要求されるコンクリートの品質との関係を明確にすることが必要である。

そのためには、まずフレッシュコンクリートの性質を物理的な意味を持った数値で表すための測定方法が問題となるが、これについての決定的な方法はまだ開発されていない。また、フレッシュコンクリートの性質に及ぼす各種要因についても明らかにされていない面が多いので、以下これらの問題について研究することにする。

## 参考文献

- 2-1) 日本工業規格；JIS A 0203-1980、コンクリート用語。
- 2-2) 土木学会；昭和49年制定コンクリート標準示方書、昭和55年版、pp.16-17。
- 2-3) ACI；ACI用語集(12)、コンクリートジャーナル、Vol.8、No.2、1970、p.79。
- 2-4) Powers, T.C.；Jour. of ACI, Proc. Vol.28, 1932, p.419。
- 2-5) 日本建築学会；建築工事標準仕様書・同解説、5鉄筋コンクリート工事、1979、p.4。
- 2-6) Uzomaka, O.J.；Concrete, Vol.4、No.4、1970、p.155。
- 2-7) Tassios, P.T.；RILEM Seminar Proc., Vol.1、1973、pp.1.3-1-1.3-36。
- 2-8) Glanville, W.H., A.R.Collins and D.D.Matthews；The Grading of Aggregates and Workability of Concrete, Road Research Technical Paper, No.5、1947。
- 2-9) Newmann, K.；Concrete Structures and Technology Research Report, No.6、London Imperial College of Science and Technology, 1960。
- 2-10) Ritchie, A.G.B.；Jour. of the Const. Div., Proc. of ASCE, Vol.94, 1968, pp.58-59。
- 2-11) 西林；フレッシュコンクリートの性質—レオロジー的アプローチ、材料、Vol.24、1975、p.359。
- 2-12) Neville, A.M., Properties of Concrete, Pitman, 1973、p.181-182。
- 2-13) 既出 2-10) p.58。
- 2-14) Yoshida, T.；A New Test Method for Workability of Concrete, Proc. of ACI, Vol.23, 1927, pp.415-433。
- 2-15) 岡田；施工軟度測定法に就て、セメント技術年報、Vol.2、1948、pp.223-229。
- 2-16) 松尾、尾山；ウォーカビリティの1測定法について、セメント技術年報、Vol.5、1951、pp.293-298。
- 2-17) 吉田；コンクリート及鉄筋コンクリート施工方法、丸善、1956、pp.186-195。
- 2-18) 既出 2-10) pp.56-57。
- 2-19) 岡田、六車編集；改訂新版コンクリート工学ハンドブック、朝倉書店、1981、pp.249-255。
- 2-20) 既出 2-16) p.227。
- 2-21) 高崎生コンクリート株式会社、日本セメント株式会社東京支店技術課；スランプメータとスランプについて、セメント工業、No.162、1980、pp.74-78。
- 2-22) Tattersall, G.H.；The Rational of a Two-point Workability Test, Mag. of Conc. Research, Vol.25, No.84, 1973, pp.169-172。
- 2-23) 村田、岡田；最新コンクリート技術選書1、フレッシュコンクリートのレオロジー・コンクリートの弾性とクリープ、山海堂、1981、pp.15-40。
- 2-24) 森永；コンクリートポンプ管内圧送圧に関する研究、コンクリートジャーナル、Vol.9、No.7、1971、pp.1-2。
- 2-25) 村田；まだ固まらないコンクリートのレオロジー



- に関する考察, 土木学会第30回年次学術講演会講演概要集, 5, 1975, pp.101-102.
- 2-26) 村田, 下山; 静的荷重によるフレッシュコンクリートの変形, セメント技術年報, Vol.30, 1976, pp. 270-273.
- 2-27) 既出 2-11) p.358.
- 2-28) Tattersall, G. H.; Structural Breakdown of Cement Pastes of Constant Rate of Shear, Nature, Vol. 175, No.4447, 1955, p.166.
- 2-29) Tattersall, G. H.; The Rheology of Portland Cement Paste, British Jour. of Appl. Physics, Vol. 6, 1955, pp.165-167.
- 2-30) 木村, 村田; メーソンリーモルタルのレオロジー的挙動について, セメント技術年報, Vol.14, 1960, pp.260-265.
- 2-31) 木村; プラスチックセメントのレオロジー的研究, セメント技術年報, Vol.16, 1962, pp.219-226.
- 2-32) Powers, T. C.; The Properties of Fresh Concrete, Wiley, 1968, pp.446-468.
- 2-33) Ish-Shalom, M. and S. A. Greenberg; The Rheology of Fresh Portland Cement Pastes, Proc. of the 4th Inter. Sumpo. Chem. Cement, Washington, 1960, pp.731-748.
- 2-34) 西林, 木山, 阪田; フレッシュペーストならびにモルタルの粘性の性質に関する基礎的研究, 土木学会第26回年次学術講演会講演概要集, 5, 1971, pp. 239-242.
- 2-35) 村田, 菊川; 試作コンクリート用回転粘度計について, 土木学会第26回年次学術講演会講演概要集, 5, 1971, pp.233-236.
- 2-36) 既出 2-24) pp.1-11.
- 2-37) 長滝, 米倉; 回転粘度計によるモルタルの流動性解析の1考察, セメント技術年報, Vol.29, 1975, pp. 207-212.
- 2-38) L'Hermite; 既出 2-27) pp.501-503.
- 2-39) 明石, 葛目; フレッシュコンクリートの振動時の粘性について, セメント技術年報, Vol.26, 1972, pp. 272-274.
- 2-40) 水口, 安永; フレッシュモルタルのレオロジー定数の測定法, セメント技術年報, Vol.27, 1973, pp. 186-191.
- 2-41) 岸谷, 岡; フレッシュセメントペーストおよびモルタルのレオロジー定数測定, 日本建築学会論文報告集, No.305, 1981, pp.1-7.
- 2-42) 戸川; 舗装用フレッシュコンクリートの細骨材の粗粒率とレオロジー定数との関係, セメント技術年報, Vol.30, 1976, pp.266-269.
- 2-43) 既出 2-23) pp.61-66.
- 2-44) 大沢; 試作メーソンリーセメントの流動性の測定, セメント技術年報, Vol.15, 1961, pp.146-150.
- 2-45) 大沢; 左官用モルタル流動性測定, 日本建築学会論文報告集, No.103, 1964, p.13.
- 2-46) Ritchie, A. G. B.; The Triaxial Testing of Fresh Concrete, Mag. of Conc. Research, Vol.14, 1962, pp.37-41.
- 2-47) 西林, 木山, 吉田; フレッシュコンクリートのレオロジー的性質に関する基礎的研究-三軸試験による考察一, 土木学会第29回年次学術講演会講演概要集, 5, 1974, pp.79-80.
- 2-48) 西林, 木山, 阪田; フレッシュコンクリートのレオロジー的性質に関する基礎的研究-三軸試験による一考察一, 土木学会第30回年次学術講演会講演概要集, 5, 1975, pp.103-104.
- 2-49) 既出 2-32) pp.505-510.
- 2-50) 角田, 明石; フレッシュコンクリートの音速について, 土木学会第33回年次学術講演会講演概要集, 5, 1978, pp.133-134.
- 2-51) 岡田, 水口; フレッシュモルタルのレオロジー定数に関する一実験, 土木学会第26回年次学術講演会講演集, 5, 1971, pp.237-238.
- 2-52) 角田, 明石; パルス波によるフレッシュモルタルの物性測定に関する一実験, 土木学会第28回年次学術講演会講演概要集, 5, 1973, pp.144-145.
- 2-53) 西林, 木山, 藤村; フレッシュコンクリートのレオロジー的性質に関する基礎的研究-弾性波伝播特性について一, 土木学会第29回年次学術講演会講演概要集, 5, 1974, pp.81-82.
- 2-54) 角田, 明石; 共振法によるフレッシュコンクリートの物性測定に関する基礎的研究, 土木学会第27回年次学術講演会講演概要集, 5, 1972, pp.71-72.
- 2-55) Bergström, S. G.; Tests of Properties of Fresh Concrete, Mag. of Conc. Research, No.11, 1952, pp.55-62.
- 2-56) Powers, T. C.; 既出 2-32) pp.474-490.
- 2-57) 角田, 明石; 振動式回転粘度計によるフレッシュコンクリートの物性測定に関する基礎的研究, 土木学会第34回年次学術講演会講演概要集, 5, 1979, pp.61-62.
- 2-58) 角田, 明石; 振動式回転粘度計によるフレッシュコンクリートの物性測定に関する基礎的研究, 土木学会第35回年次学術講演会講演概要集, 5, 1980, pp.309-310.
- 2-59) 川東, 玉井; 高性能減水剤を添加したセメントペーストのレオロジー特性, 土木学会第35回年次学術

- 講演会講演概要集, 5, 1980, pp.305—306.
- 2-60) Papadakis; 既出 2-32) p.461.
- 2-61) Uzomaka, O. J.; A Concrete Rheometer and its Application to a Rheological Study of Concrete Mixes, *Rheologica Acta.*, Band 13, Heft 1, 1974, pp.520—529.
- 2-62) Asaga, K. and D. M. Roy; Rheological Properties of Cement Mixes, *Cement and Concrete Research*, Vol.10, 1980, pp.287—295.
- 2-63) 菊川; セメントペーストの粘性と粘度方程式, 土木学会第35回年次学術講演会講演概要集, 5, 1980, pp.303—304.
- 2-64) 梅屋, 大坪, 宮井; セメントペーストのレオロジー, 第27回レオロジー討論会講演要旨集, 1979, pp.39—41.
- 2-65) Otsubo, Y., S. Miyai and K. Umeya; Time-dependent Flow of Cement Pastes, *Cement and Concrete Research*, Vol.10, 1980, pp.631—638.
- 2-66) 村田, 菊川; まだ固まらないコンクリートのレオロジー定数測定法に関する一提案, 土木会論文報告集, No.284, 1979, pp.117—126.
- 2-67) 西林, 木山, 阪田; フレッシュコンクリートのレオロジー的性質に関する研究, *材料*, Vol.24, No.260, 1975, pp.418—424.
- 2-68) Wesche, K., H. Flatten and W. von Berg; On the Influence of Separations on the Rheological Investigations of Cement Paste and Mortar in the Rotation Rheometer, *RILEM Seminar Proc.*, Vol.1, 1973, pp.2.10-1—2.10-11.
- 2-69) 村田, 菊川; 回転粘度計によるフレッシュコンクリートの流動解析, セメント技術年報, Vol.29, 1975, pp.204—207.
- 2-70) 村田, 越川, 黒須; 回転粘度計によるモルタルのレオロジー定数の簡易測定法, セメント技術年報, Vol.30, 1976, pp.271—281.
- 2-71) ライナー, M.; 改訂レオロジーの基礎理論, コロナ社, 1962, p.312—313.
- 2-72) 牟田, 佐藤; 湿式吹付耐火被覆のポンプ圧送施工に関する研究, 第3報, 日本建築学会論文報告集, No.272, 1978, pp.1—10.
- 2-73) Tattersall, G. H.; Present Problems Associated with the Study of Cement Paste Rheology, *RILEM Seminar Proc.*, Vol.1, 1973, pp.2.3-1—2.3-18.
- 2-74) 既出 2-71) p.23.
- 2-75) 風間; コンクリートとレオロジー, 日本レオロジー学会誌, Vol.9, 1981, p.104.
- 2-76) 村田; まだ固まらないコンクリートのレオロジーに関する基礎的研究, *コンクリート工学*, Vol.15, No.1, 1977, p.33.
- 2-77) Roller, P. S.; Plastic Flow of Dispersion and a New Approach to the Study of Plasticity, *The Jour. of Physical Chemistry*, Vol.43, 1939, pp.457—489.
- 2-78) 高分子学会レオロジー委員会編; レオロジー測定法, 共立出版, 1965, p.111.
- 2-79) 既出 2-78) pp.113—117.
- 2-80) 岡, 小川; 平行板プラストメーターの理論, 材料試験, Vol.9, 1960, pp.321—324.
- 2-81) 岡; ビンガム物体に対する平行板プラストメーターの理論, *材料*, Vol.12, 1963, pp.314—316.
- 2-82) 明石, 尾崎, 垣内; フレッシュコンクリートの振動時における特性について, 土木学会第30回年次学術講演会講演概要集, 5, 1975, pp.87—88.
- 2-83) 西林, 矢村, 吉野, 前田; 流動化コンクリートのレオロジー特性に関する2, 3の実験, セメント技術年報, Vol.35, 1981, pp.214—217.
- 2-84) 吉岡, 足立, 石村; 粘塑性流体の球を過ぎる遅い流体について, *化学工学*, Vol.35, 1971, pp.1144—1152.
- 2-85) Ansley, R. W.; Motion of Spherical Particles in a Bingham Plastic, *AIChE Journal*, Vol.13, 1967, pp.1193—1196.
- 2-86) 村田, 鈴木; 傾斜管によるグラウトのコンシステンシー試験法, 土木学会第33回年次学術講演会講演概要集, 5, 1978, pp.131—132.
- 2-87) 村田, 鈴木; グラウトモルタルの管内流動に関する研究, 土木学会第34回年次学術講演会講演概要集, 5, 1979, pp.67—68.
- 2-88) 鈴木; まだ固まらないコンクリートの管内流動のレオロジー的解析, 土木学会第35回年次学術講演会講演概要集, 5, 1980, pp.313—314.
- 2-89) 村田, 鈴木; 注入モルタルの新しいコンシステンシー試験方法, セメントコンクリート, No.413, 1981, pp.23—29.
- 2-90) 既出 2-66) p.124.
- 2-91) 既出 2-32) pp.505—510.
- 2-92) 既出 2-10) pp.67—69.
- 2-93) 既出 2-10) p.67.
- 2-94) Ritchie, A. G. B.; The Triaxial Testing of Fresh Concrete, *Mag. of Conc. Research*, Vol.14, No.40, 1962, pp.37—42.
- 2-95) 岡本; 引き上げ抵抗試験によるコンクリートのワーカビリティの測定について, 土木学会第34回年次学術講演会講演概要集, 5, 1979, pp.69—70.
- 2-96) 既出 2-32) pp.468—472.

- 2-97) Ukrainčik, V. ; Study on Fresh Concrete Flow Curves, Cement and Concrete Research, Vol.10, 1980, pp.203—212.
- 2-98) 角田, 明石 ; まだ固まらないコンクリートの縦波速度について, 土木学会第25回年次学術講演会講演集, 5, 1970, pp.85—86.
- 2-99) 角田 ; フレッシュコンクリートの複合機構がレオロジー特性におよぼす影響について, 土木学会第31回年次学術講演会講演概要集, 5, 1976, pp.270—271.
- 2-100) 磯田, 大坪, 安江, 梅屋 ; Raised Cosine Pulseを用いた新しい粘弾性測定法, レオロジー学会誌, Vol.4, 1976, pp.133—136.
- 2-101) 玉井, 川東 ; ベントナイトを混入したセメントペーストのレオロジー, 土木学会第34回年次学術講演会講演概要集, 5, 1979, pp.63—64.
- 2-102) 玉井, 川東 ; 高性能減水剤を用いたセメントペーストのレオロジー, セメント技術年報, Vol.34, 1980, pp.163—167.
- 2-103) 玉井, 川東 ; 高性能減水剤を用いたセメントペーストのレオロジー特性, 第3回コンクリート工学年次学術講演会講演論文集, 1981, pp.37—40.
- 2-104) 梅屋 ; セメントモルタルのレオロジー, 土木学会誌, Vol.64, No. 4, 1979, pp.27—34.
- 2-105) Clark ; Theoretical Basis of Pressure Grout Penetration, Jour. of ACI, Vol.52, 1955, pp.215—224.
- 2-106) 既出 2-32) p.463.
- 2-107) 既出 2-33) p.735.
- 2-108) Lapasin, R., V. Longo and S. Rajgely ; Thixotropic Behavior of Cement Pastes, Cement and Concrete Research, Vol. 9, 1979, pp.309—318.
- 2-109) 既出 2-10) p.66.
- 2-110) 既出 2-32) p.458.
- 2-111) 既出 2-32) p.459.
- 2-112) 既出 2-32) p.463, Table 10.2の脚注.
- 2-113) 既出 2-32) p.462.
- 2-114) 既出 2-32) p.463.
- 2-115) 村田, 菊川 ; セメントペーストおよびモルタルのコンシステンシーのレオロジー的考察, セメント技術年報, Vol.26, 1972, pp.268—271.
- 2-116) 角田, 明石 ; セメントペーストの粘度式について, セメント技術年報, Vol.32, 1978, pp.88—91.
- 2-117) 菊川 ; セメントペーストの粘性と粘度方程式, 土木学会第35回年次学術講演会講演概要集, 5, 1980, pp.303—304.
- 2-118) 既出 2-32) pp.464—468.
- 2-119) 既出 2-32) pp.305—357.
- 2-120) Legrand, C. ; Les comportements rheologiques du mortier frais, Cement and Concrete Research, Vol. 2, 1972, pp.17—31.
- 2-121) Legrand, C. ; Rhéologie des mélanges de ciment ou de sable et deau, Revue des Matériaux de Construction, Nos.659—660, 1972, pp.217—222.
- 2-122) 烏田, 森永, 成田 ; コンクリートのポンパビリティに関する研究 その1, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1969, pp.113—114.
- 2-123) 菊川 ; フレッシュコンクリートのレオロジーに関する基礎的研究, 土木学会第27回年次学術講演会講演概要集, 5, 1972, pp. 5—8.
- 2-124) 角田, 藤井, 明石 ; フレッシュコンクリートの粘度式について, セメント技術年報, Vol.33, 1979, pp.227—230.
- 2-125) 森, 乙竹 ; 懸濁液の粘度について, 化学工学, Vol.20, No. 9, 1956, pp.488—494.
- 2-126) 村田 ; まだ固まらないコンクリートのレオロジー的性質の活用, セメントコンクリート, No.312, 1973, pp.16—23.
- 2-127) 西林, 木山, 藤村 ; フレッシュモルタルのレオロジー的性質に関する研究—配合条件による化学混和剤の影響—, 土木学会第28回年次学術講演会講演概要集, 5, 1973, pp.139—141.
- 2-128) 村田 ; まだ固まらないコンクリートのレオロジーの研究, コンクリートジャーナル, Vol.10, No. 2, 1972, pp. 1—10.
- 2-129) Hobbs, D. W. ; Influence of Aggregate Volume Concentration upon the Workability of Concrete and Some Prediction from the Viscosity-Elasticity Analogy, Mag. of Conc. Research, Vol. 28, No.97, 1976, pp.191—202.
- 2-130) Murata, J. and H. Kikukawa ; Studies on Rheological Analysis of Fresh Concrete, RILEM Seminar Proc., Vol. 1, 1973, pp.1.2-1—1.2-33.
- 2-131) Kaplan, M. F. ; The Effects of the Properties of Coarse Aggregate on the Workability of Concrete, Mag. of Conc. Research, Vol.10, No. 29, 1958, pp.63—74.
- 2-132) 藤田, 西林, 井上 ; フレッシュコンクリートのレオロジー的性質に関する研究—三軸試験による考察—, 土木学会第33回年次学術講演会講演概要集, 5, 1978, pp.121—122.

## 第3章 フレッシュコンクリートのレオロジー的性質の測定方法に関する研究

### 3.1 概 説

フレッシュコンクリートの性質は、古くから重要な問題であり、2.3.1で述べたように数多くの測定方法が開発され、多くの知見が報告されている<sup>3-1)</sup>。これらの測定方法は、フレッシュコンクリートの(1)一定外力に対する抵抗力 (2)一定外力に対する変型量 (3)一定変形に要するエネルギー量 (4)貫入(通過)抵抗などを測定するものに分類できる。

また、フレッシュコンクリートを降伏値を持った塑性体と考えると、これら従来の方法は、(1)主として降伏値に関連した性質 (2)主として塑性流動の抵抗力に関連した性質 (3)降伏値と流動抵抗力の両者に関連した性質を測定するものとも分類できよう。しかし、測定時にフレッシュコンクリートに作用しているひずみ速度の大きさを考慮すると、いずれの方法もいくらかは複合した性質を測定していると考えられ、またそれぞれの測定値のレオロジー的意味も明確でない。

したがって、フレッシュコンクリートの性質を定量的に表すためには、物理的な意味を持った数値でフレッシュコンクリートの性質を測定する方法が必要になる。このため、2.3で述べたようにフレッシュコンクリートを

- (1) 流体あるいはビンガム物体
- (2) 粒状材料
- (3) 粘弾性体

と仮定し、(1)の場合には、回転粘度計やその他の粘度計を用いてそのレオロジー定数を測定することが試みられているが、回転粘度計では広い範囲の流動速度での測定ができるという利点がある反面、粘度計壁面と試料との間にいわゆるすべりが発生する壁効果などにより正確な値を簡単に求めることは困難である。また、比較的軟らかいコンクリートにしか

適用できないなどの問題点があり<sup>3-2-5)</sup>研究者によって求められた値がかなり異なっている<sup>3-5,6)</sup>。

(2)の上のような粒状材料と考えると三軸試験や直接せん断試験による方法は、比較的硬い試料に適するが、作用させ得るせん断ひずみ速度は小さく<sup>3-7)</sup>実際の施工を考えると得られた結果は限定された一部の施工条件に対応する資料としかならない。

(3)の仮定を行う動的な測定方法については、角田ら<sup>3-8-13)</sup>梅屋ら<sup>3-14,15)</sup>の研究があるが、十分とはいえない。

また、多くの方法は、試料を流動させるなど大きな外乱を与え、その応答を測定することによって物質の性質を求めるものであり、コンクリートの硬化過程など試料の内部構造を破壊することなくその物性を測定することはできない。

このように、現在フレッシュコンクリートのレオロジー的性質を測定する試みはいくつか成されているが、満足な方法は開発されていない。物質のレオロジー量を測定するための方法は、数多くあるが<sup>3-16)</sup>フレッシュコンクリートのように大きな寸法のしかもかなり軟らかいものから硬いものまでを測定できるものは見あたらない。そこで、それぞれ特徴を持つ測定装置を目的に応じて使い分けることが考えられる。

本章では、フレッシュコンクリートの性質を定量的に測定するための方法について検討するため、軟らかい試料に適する回転粘度計および落球型粘度計である球ひきあげ粘度計、比較的硬い試料に適する平行板プラストメータおよび大きな外乱を与えることなく測定することができる動的測定法であるRaised Cosine Pulse法(以下R.C.P.法と書く)を取り上げ、これらの装置によるフレッシュモルタル・コンクリートのレオロジー量の測定方法、測定精度、適用性などについて検討する。

## 3.2 二重円筒型回転粘度計による測定方法の検討

### 3.2.1 はじめに

本節においては、フレッシュコンクリートの基礎となるフレッシュモルタルを図3.1に示すようなビンガム物体と仮定し、そのレオロジー定数を二重円筒型回転粘度計で測定する方法について基礎的な検討を行うこととする。

フレッシュモルタルのような分散系の物質のレオロジー的性質を回転粘度計で測定する際には、2.3.3 (1)で述べたように装置の寸法、端末効果および壁効果が問題となる。

回転粘度計の理論では、試料が無限長の円筒型の層流として導かれているが、実際の長さは有限であり、円筒底面間にも何らかの物質があるので、端末効果という理論との相違が生ずる。また、壁効果は、フレッシュモルタルのような分散系の物質を流動させると、分散媒と分散質とが分離して、粘度計の壁面近くで水分の多いペースト層が形成され、いわゆるすべりが生じることをいい、理論におけるすべりが無いという条件と異なる。

したがって、これらの効果は、いずれも測定結果に誤差を与えるのでまず解決しなければならない。

そこで、装置の寸法は、既往の研究結果<sup>3-2~5,17)</sup>を参考にして決定し、端末効果および壁効果の影響の程度について調査し、さらにこれらの影響を補正す

る方法について検討する。

### 3.2.2 二重円筒型回転粘度計の理論

同軸二重円筒型回転粘度計は、図3.2に示すようなもので同軸の2つの内外円筒間に試料を入れ、内円筒あるいは外円筒を異なった回転数で回転させ、そのときの内円筒に作用するモーメントを求め、それらからコンシステンシー曲線を描いてレオロジー定

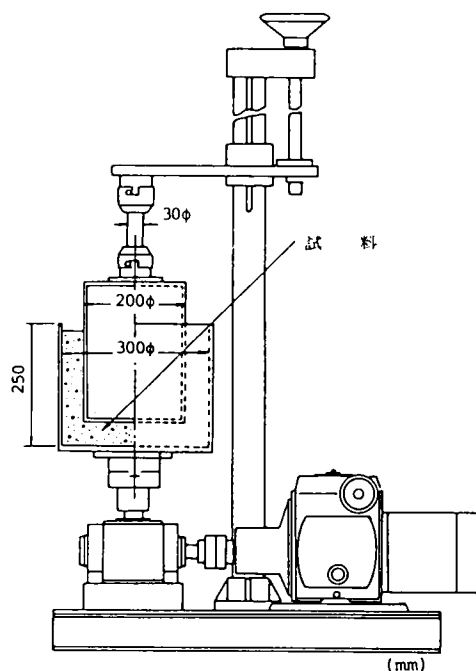


図3.2 試作二重円筒型回転粘度計

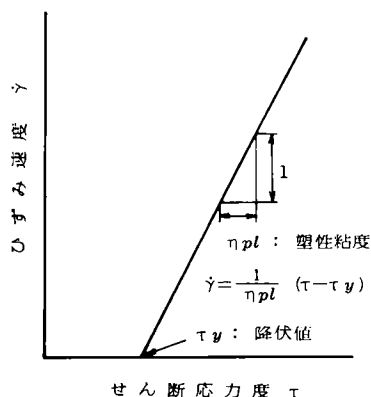


図3.1 ビンガム物体の流動曲線

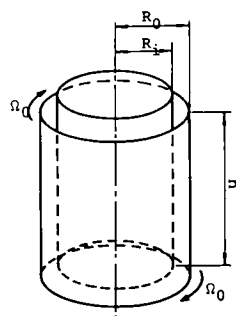


図3.3 回転粘度計の内外円筒

数を求めるものである。

本研究では、フレッシュモルタルを対象とし、この測定に適すると考えられる外円筒回転型の Couette-Hatschek の装置と呼ばれるものを用いたので、以下この装置の理論について簡単に述べることにする<sup>3-18)</sup>

回転粘度計において、図3.3のように外円筒が一定の角速度  $\Omega_o$  で回転し、円筒間の試料が定常状態になった場合を考える。

内円筒の凸面に作用するせん断力は、円筒の共軸周りに回転モーメント  $M$  を生じ、外円筒の凹面に作用するせん断力は回転モーメント  $-M$  を生じる。試料の各層にもこれと同じモーメントが作用するから、せん断応力を  $\tau$ 、半径を  $r$  とすると、

$$M = \tau \times 2\pi r h \times r \quad (3.1)$$

となる。ただし、 $h$  は試料に沈めた内円筒の高さで、端末効果のある場合はこの影響を試料と接する円筒の長さに換算したものを加えた相当高さとする。

塑性粘度を  $\eta_{pl}$ 、降伏値を  $\tau_y$  とし、せん断ひずみ速度を  $\dot{\gamma}$  としたビンガム物体のレオロジー基礎式  $\tau = \eta_{pl}\dot{\gamma} + \tau_y$  を式(3.1)に代入すると、

$$\tau = \frac{M}{2\pi r^2 h} = \eta_{pl}\dot{\gamma} + \tau_y \quad (3.2)$$

となる。

$\dot{\theta}$  を円筒間の試料の角速度とすると、 $\dot{\gamma} = r \frac{d\dot{\theta}}{dr}$  となるので、これを式(3.2)に代入すると、

$$\frac{M}{2\pi r^2 h} = \eta_{pl} r \frac{d\dot{\theta}}{dr} + \tau_y \quad (3.3)$$

となる。この式を積分すると、

$$\eta_{pl}\dot{\theta} = -\frac{M}{4\pi h r^2} - \tau_y \ln r + C \quad (3.4)$$

となり、内円筒の壁面  $r = R_i$  においてすべりがないと仮定すれば、内円筒に接する試料の角速度  $\dot{\theta}_i = 0$  から、

$$C = \frac{M}{4\pi h R_i^2} + \tau_y \ln R_i \quad (3.5)$$

となる。したがって、

$$\eta_{pl}\dot{\theta} = \frac{M}{4\pi h} \left( \frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{r^2} \right) + \tau_y \ln \frac{R_i}{r} \quad (3.6)$$

となるので、外円筒壁面  $r = R_o$  においてもすべりがないとすれば、外円筒に接する試料の角度  $\dot{\theta}_o$  は外円筒と同じ角速度であるから、 $\dot{\theta}_o = \Omega_o$  となり、

$$\eta_{pl}\Omega_o = \frac{M}{4\pi h} \left( \frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2} \right) + \tau_y \ln \frac{R_i}{R_o} \quad (3.7)$$

となる。いま、装置定数として、 $K_1$  および  $K_2$  を、

$$K_1 = \frac{1}{4\pi h} \left( \frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2} \right)$$

$$K_2 = \ln \frac{R_o}{R_i}$$

とおくと、回転粘度計の基本式であり Reiner-Riwlin の式と呼ばれる。

$$\Omega_o = \frac{K_1}{\eta_{pl}} M - \frac{K_2}{\eta_{pl}} \tau_y \quad (3.8)$$

を得る。

式(3.8)は、装置定数  $K_1$ 、 $K_2$ 、塑性粘度  $\eta_{pl}$  および降伏値  $\tau_y$  が定数であるので、 $\Omega_o - M$  線図は直線となる。

ところが、式(3.8)を用いて  $\Omega_o - M$  線図を描き、 $\eta_{pl}$  や  $\tau_y$  を求めようとするとき、装置の寸法によってその勾配は異なるので、この影響をなくするために、コンシステンシー変数と呼ばれる  $P$  および  $V$  を式(3.9)のように定義して、図3.6や図3.7のように  $P - V$  線図を描くと、その直線の勾配の逆数から  $\eta_{pl}$ 、 $P$  軸との切片から  $\tau_a$  が求められ、式(3.10)を用いて  $\tau_y$  が求まる。

$$P = \frac{M}{2\pi h R_i^2}, \quad V = \frac{2\Omega_o}{1 - \left(\frac{R_i}{R_o}\right)^2} \quad (3.9)$$

$$\tau_y = \frac{\left\{ \left( \frac{R_i}{R_o} \right)^2 - 1 \right\}}{2 \ln \frac{R_i}{R_o}} \tau_a \quad (3.10)$$

### 3.2.3 実験の方法

#### (1) 回転粘度計

本研究で試作した回転粘度計は、図3.2に示したもので、外円筒内半径が15cm、内円筒外半径が10cmで円筒底面間隔は最大15cmまで変えることができるものとした。内外円筒間隔は、小さいほど理論流速分布に近く精度よく測定できるが、モルタルは最大5mm程度の径を持つ粒子を含むため、その間隔は粒子の最大径の10倍の5cmとした。外円筒の回転速度は、0.5～9.5rpm（角速度 約0.05～1 rad/s）まで連続的に変えられるものとした。

#### (2) 使用材料および練り混ぜ

セメントは、比重3.16、ブレン値3100cm<sup>2</sup>/gの普通ポルトランドセメントを用いた。細骨材は、徳島県吉野川産の川砂で、比重2.62、粗粒率2.74で土木学会の標準粒度範囲のほぼ中央を通るものを使用した。

モルタルは、容量50ℓの強制練りミキサを用いて、全材料投入後3分間で15ℓを練り混ぜた。なお、練り混ぜ水の温度を調整して、モルタルの練り上がり温度が20±2℃になるようにした。室温も20℃近くにして、測定中モルタルの温度が変化ないように

努めた。

フロー値は、JIS R5201によるフロー値およびフローコーンを取り除いた直後の静定フロー値とを測定した。

#### (3) ペーストおよびモルタルの配合

モルタルの配合要因は、モルタルやコンクリートのレオロジー構成式を検討することと関連させるためおよびモルタルをセメントペーストと細骨材とから成る2相材料と考えたため、本論文を通して配合要因をすべて体積濃度（割合）で表した。

セメントペーストの品質は、ペースト中のセメントの体積濃度  $v_c (= \frac{c}{w+c})$  で表し、モルタルの場合、細骨材量はモルタル中の細骨材の体積濃度  $v_s (= \frac{s}{w+c+s})$  で表した。

測定の対象とした配合は、表3.1に示す53種とした。

#### (4) 回転粘度計による測定

端末効果の影響を調べるための測定としては、内外円筒間に所定量のモルタルを入れ、外円筒の回転数を0.62, 1.24, 1.86, 2.48, 3.10, 3.72, 4.34, 4.96, 6.20, 7.44, 8.68および9.92rpmとコンシステンシー変数  $V$  が大体0.25s<sup>-1</sup>あるいは0.5s<sup>-1</sup>間隔になるように12段階に変えた。ペースト3種およびモルタル6種計9種の配合について、底面間距離を図3.9に示すように1.0cmから14.0cmまで8種類に変化させた。

壁効果の影響を検討するにあたっては、端末効果

表3.1 測定したペーストおよびモルタルの配合

$v_c$ (W/C)	0.300	0.325	0.350	0.375	0.400	0.425	0.450	0.475	0.500	0.525
$v_s$	(0.74)	(0.66)	(0.59)	(0.53)	(0.48)	(0.43)	(0.39)	(0.35)	(0.32)	(0.30)
0(ペースト)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
0.10				○.2	○.2	○.2	○.2	○.2	○.2	
0.20				○.6	○.5	○.5	○.5	○.4	○.4	
0.30		1.1	1.0	○.9	○.9	○.8	○.8	○.7	○.7	○.7
0.40	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	1.0	1.0	○.9	○.9
0.50	2.8	2.5	2.4	2.2	2.1	1.9	1.8	1.7		
0.60		3.8	3.5	3.3						

注) 表中で○印は測定したものを示し、○印中の数字はS/Cを示す。

の検討結果より、底面間距離は5 cmの一定とし、外円筒回転数を前述と同じ12段階に変えて各配合のコンシステンシー曲線を求めた。また、円筒壁面に発生するすべり層の影響を補正する方法として、本実験では、図3.4および図3.5に示すような内外円筒間の試料表面に標点をつけた高さ2.5cm、厚さ1 mmのプラスチックの円棒を浮かし、外円筒を回転させ定常状態となったと判断できたときの円周方向の5秒間の相対変位  $x_1$  および  $x_2$  を測定した。円棒は、中心軸から半径11.25cm、12.50cmおよび13.75cmになるようにした。

各回転数でのトルクは、内円筒の固定腕に作用するトルクをX-Tレコーダーで記録し、定常状態になったときの値を読み取った。

測定は、回転数の少ない方から順次行い、試料温度などほぼ同じ試験条件で行われた菊川ら<sup>3-19)</sup>が報告している経過時間の影響がないと考えられる練り混ぜ後約40分以内に終るようにした。各回転数での測定が終了した後は、測定中に生じた材料分離の

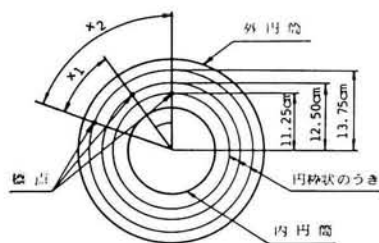


図3.4 円棒状のうき

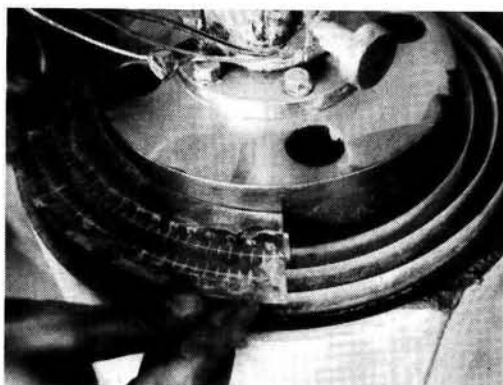


図3.5 円棒状のうきおよびその回転量の測定状況

影響を少なくするため、全体が均一になるようにかき混ぜた。

なお、測定は、各条件とも日を変えて2回行い、その平均を測定値とした。

コンシステンシー曲線は、このようにして求めたトルクおよび回転数から、式(3.9)を用いてそれぞれ  $P$  および  $V$  を計算し、図上にプロットして求めた。

レオロジー定数は、前述のコンシステンシー曲線で直線部分の測点について最小2乗法を用いて直線回帰式を求め、その直線の勾配の逆数から塑性粘度  $\eta_{pl}$ 、 $P$  軸との切片から  $\tau_a$  を求め、式(3.10)を用いて降伏値  $\tau_y$  を求めた。

### 3.2.4 実験結果およびその考察

フレッシュモルタルの温度や注水後の経過時間は、モルタルの性質に影響するが、3.2.3で述べたように、試料温度は、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$  になるようにした。また、レオロジー定数に影響しないといわれる注水後40分以内<sup>3-19)</sup>に測定を終了したので、以下の考察においては、これらの影響は小さいとして無視する。

#### (1) コンシステンシー曲線

セメント体積濃度  $v_c$  を表3.1に示すように変えたときのセメントペーストのコンシステンシー曲線を図3.6に、細骨材の体積濃度  $v_s$  を0.40としたモルタルのコンシステンシー曲線を図3.7に示す。

これらの図に見られるように、セメント体積濃度  $v_c$  が0.500より大きいすなわち水セメント比が0.30より小さい2つの配合では、 $V$  が小さい範囲で直線関係から若干はずれている。しかし、この例外を除いた水セメント比が0.30より大きい一般の配合は、

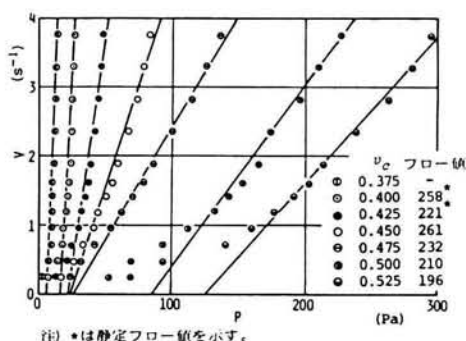


図3.6 フレッシュペーストのコンシステンシー曲線



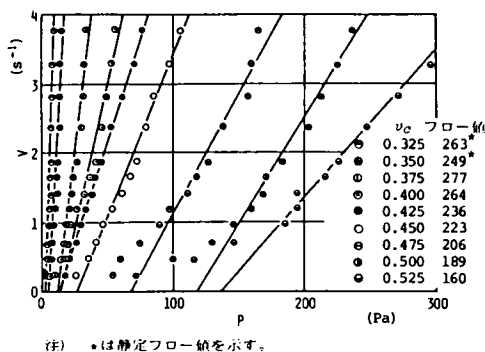


図3.7 フレッシュモルタルのコンシステンシー曲線  
( $v_s = 0.40$ )

すべて直線関係が得られている。これは、ほぼ同じ配合で、大差ない装置寸法、測定条件における西林ら<sup>3-17)</sup>の報告と同様の結果となっている。

したがって、ビンガム物体では、このコンシステンシー曲線は直線となるので、一般の配合のフレッシュペーストは、ビンガム物体と近似できることになる。

### (2) 端末効果の検討

外円筒底面と内円筒下面との間の試料および試料深さが有限であることによる影響を調べるために、底面間距離を図3.8に示すように1.0cmから14.0cmまで8種類に変えて測定した結果の1例を壁効果を無視して整理すると、底面間距離が1.0cmおよび2.0cmの場合以外は大きな結果となっている。

また、長さが有限であることによる影響を補正する方法として、試料の内円筒に接している長さ $h$ を変えて測定し、測定結果を $1/h$ に対してプロットし、 $1/h = 0$ に外挿する方法がある。そこで、図3.9に示すように、 $1/h$ に対して塑性粘度 $\eta_{pl}$ および降伏値 $\tau_y$ をプロットすると、 $1/h = 0$ に外挿することはできないが、底面間距離が1.0cmおよび2.0cmの場合を除くと、 $1/h$ の大きさに関係なくほぼ同じ値となっている。このような結果は、他の配合の場合も同様となっている。これは、底面間距離が小さい場合には、底面間の試料の抵抗力が大きいためと考えられる。

したがって、底面間距離を4cm程度以上にすれば端末効果の影響には、何の補正をしなくても正確な値が測定できることになる。

このことに関して、硬練りのモルタルを円筒底面

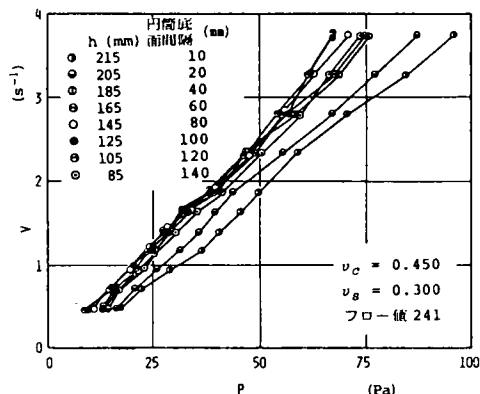


図3.8 底面間距離を変化させたときのコンシステンシー曲線

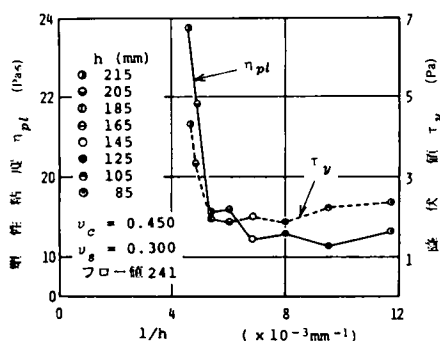


図3.9 内円筒深さの逆数とレオロジー定数との関係

間にはさむ方法<sup>3-20)</sup>円筒底面間隔を2cm以上にすればよいという西林らの方法<sup>3-17)</sup>があり、これらの方法によって特別の補正は必要ないとしている。

そこで、本実験では、底面間間隔を5cmの一定とし、端末効果については、何の補正もしないことにする。

### (3) 壁効果の検討

フレッシュモルタルの場合、3.2.1で述べた壁効果<sup>3-21)</sup>と呼ばれるいわゆるすべりが生ずることは、その構成成分や混合割合から十分予測されるので、すべりがなかった式(3.8)のReiner-Riwlin式を用いて求めたレオロジー定数は、真の値となっていないことが考えられる。

壁効果の影響を補正するためには、粘度計中での試料の正確な流速分布を求める必要がある。菊川<sup>3-22)</sup>や村田らは<sup>3-5)</sup>粘度計中の試料表面にうきを浮かし、このうきの動きをカメラで撮影し、正確な

流速を求めている。長滝らは、円筒状のうきを用いた方法で流速分布を測定し、遠心力のためうきの位置が正確になると述べている。<sup>3-23)</sup>これらの方法は、いずれも16mmカメラを用いており、撮影やその解析に手数を要する。

そこで、本実験では、3.2.3で述べたような標点をつけた半径の異なる図3.4および図3.5に示す円棒状のうきの流動状態を定常と考えられる5秒間の相対変位  $x_1$  および  $x_2$  を測定し、半径13.75cmと半径12.50cmの間の試料の角速度差を求め、次式でコンシステンシー変数の修正値を計算することとする。

$$\left. \begin{aligned} P' &= \frac{M}{2\pi h R_{12.50}} \\ V' &= \frac{2(\Omega_{13.75} - \Omega_{12.50})}{1 - a'} \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

ただし、 $\Omega_{13.75}$  および  $\Omega_{12.50}$  は、それぞれ半径  $R_{13.75}$  および  $R_{12.50}$  の部分の試料の角速度であり、 $a' = (\frac{R_{12.50}}{R_{13.75}})^2$  である。

なお、測定に用いた円棒は、長滝ら<sup>3-23)</sup>が述べているように、遠心力が作用し、半径方向の移動がなくその位置を保つことが確認されたので、試料の円周方向の流動を正確にとらえている。

そこで、式(3.11)を用いて修正したコンシステンシー曲線を求め、壁効果を無視した場合と比較して示すと、図3.10および図3.11のようになり、配合の種類によってその相違の程度は異なっている。すなわち、硬い試料ほど壁効果を補正したものとしないうものとの差が大きく、硬い試料の方がすべりを生じやすくその影響が大きいという推察の結果と一致している。

したがって、村田ら<sup>3-5)</sup>長滝ら<sup>3-23)</sup>も指摘しているように、回転粘度計でフレッシュモルタルなどの真のレオロジー定数を求めるためには、Tattersall のようにすべり層の存在に疑問を持っている見解もあるが、壁効果の影響を何らかの方法で補正しなければならない。本実験で用いた方法は、近似法ではあるが、測定が簡単であり、かなり正確な値を測定していると考えられ、有効な方法と思われる。

しかし、Wesche は、回転粘度計の寸法および壁面の状態が同じでなければ、相互の比較は困難であり、

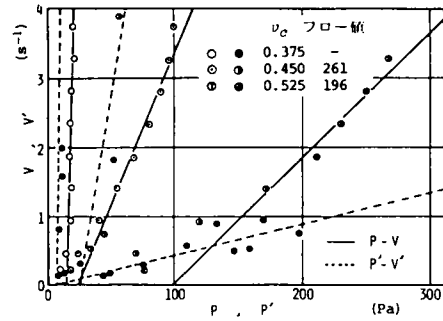


図3.10 フレッシュペーストの修正コンシステンシー曲線  
( $t_s = 0.150$ )

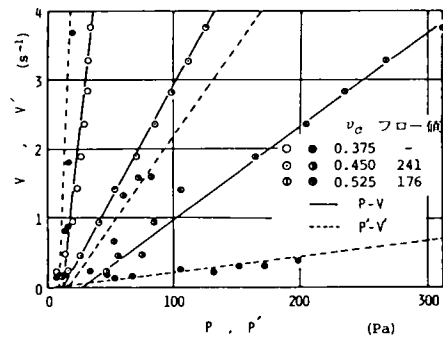


図3.11 フレッシュモルタルの修正コンシステンシー曲線  
( $t_s = 0.300$ )

チクソトロピーや測定中の粒子の沈殿により試料の性質が変化し、同一回転速度でトルクが低下したりするので真のレオロジー定数は、回転粘度計では求まらないという見解を發表している。<sup>3-24)</sup>この同一回転速度でのトルクの低下は、本実験においても確認され、この原因については、今回の実験では確認されておらず今後の検討が必要である。

### 3.2.5 まとめ

以上述べてきたように、二重円筒型回転粘度計でフレッシュモルタルのレオロジー定数を求めるためには、端末効果および壁効果の影響について考慮する必要がある。端末効果については、円筒底面間距離を4cm程度以上にすることによって、特別の補正をしなくても事実上影響はなくなる。壁効果については、何らかの補正が必要であり、本研究で用いた方法は、近似法であるが測定が簡単で有効である。

また、フレッシュペーストやモルタルをビンガム物体と仮定することは、壁効果を補正したコンシ

テンシー曲線の結果から適当と考えられる。しかし、モルタルなどの真のレオロジー定数を求めるためには、試料が受けているせん断ひずみ速度の大きさや作用時間、装置の寸法や測定方法などの影響もあることが指摘されており、これらについては今後検討する必要がある。

一方、実際の施工工程におけるポンプ工法の管内面、シュートの壁面、型わくの内面等フレッシュコンクリートが壁面に接して流動している部分では、フレッシュコンクリートは、回転粘度計の壁面付近と同じような状態にあるので、壁効果を補正しないみかけのレオロジー定数は、施工方法と配合の関係、ポンプに必要な馬力など施工における基礎的なデータとして利用できる可能性も考えられる。

### 3.3 球ひきあげ粘度計による測定方法の検討

#### 3.3.1 はじめに

粘性体中をゆっくり運動する球の受ける抵抗に関するStokesの解<sup>3-25)</sup>を応用した落球型粘度計<sup>3-26)</sup>がある。これは、粘性液体中に球を落とす重力と浮力と粘性抵抗とがつりあったときに達する定常速度から次式で<sup>3-26)</sup>粘性係数を求めるものである。

$$\eta = \frac{2ga^2(D - \rho)t}{90L} \quad (3.12)$$

ただし、 $\eta$  は液体の粘性係数(Pa・s)、 $g$  は重力加速度(m/s<sup>2</sup>)、 $D$  は球の密度(kg/m<sup>3</sup>)、 $\rho$  は液体の密度(kg/m<sup>3</sup>)、 $L$  は落下距離(m)、 $t$  は距離 $L$ を落下するのに要する時間(s)、 $a$  は球の半径(m)である。

この原理を応用して、L'Hermite らは<sup>3-27)</sup>図3.12に示すような装置を用いて、振動を受けているフレッシュコンクリートをニュートン流体と仮定して測定を行っており、明石ら<sup>3-28)</sup>も同様の研究を行っている。

この方法は、振動締固めなど実際の施工中の状態でのフレッシュコンクリートなどの性質を測定できる可能性があるもので、この原理を用いた測定装置について検討することは意義がある。

そこで、セメント体積濃度の小さいすなわち水セメント比の大きい比較的やわらかいペーストやモル

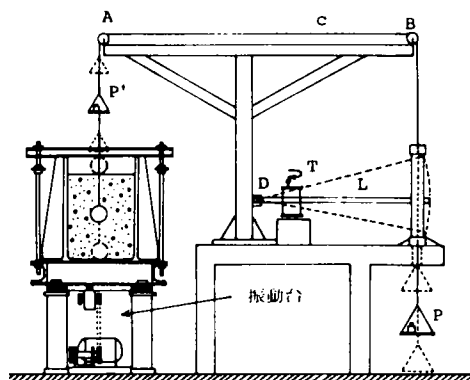


図3.12 L'Hermite らの装置<sup>3-27)</sup>

タルは、ニュートン流体に近似できるのではないかと考え、前述したStokesの式を応用した装置を試作し、ペーストおよびモルタルを対象として、装置の適用性およびニュートン流体と仮定することの是非について検討する。

#### 3.3.2 実験の方法

##### (1) 球ひきあげ粘度計

ニュートン流体中をゆっくり動く球の抵抗力と粘性係数との関係は、Stokesの法則<sup>3-25)</sup>

$$\eta = \frac{F}{60\pi vr} \quad (3.13)$$

ここで、 $\eta$ ；粘性係数(Pa・s)

$F$ ；球の受ける抵抗力(N)

$v$ ；球の移動速度(m/s)

$r$ ；球の半径(m)

で表される。

したがって、既知の速度で球を動かし、その時の抵抗力を測定すれば、粘性係数 $\eta$ が求まることになる。そこで、図3.13に示すような定速度で球をひきあげられるようにした球ひきあげ粘度計を試作した。

試料中の最大寸法と球の大きさとの比は、試料を均一材料とみなすために、ある値以上が要求されると考えられる。これを実験的に検討するため、鋼球の大きさは、表3.2に示す表面積比がだいたい1：2：4になる3種に変えた。

また、球に作用する抵抗力は、図3.13に示すように作用する抵抗力に応じて、容量約5N、10Nおよび20Nのロードセルを用いて、静ひずみ測定器で測

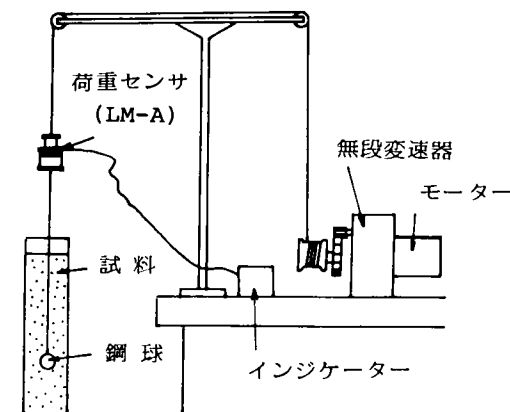


図3.13 試作球ひきあげ粘度計

表3.2 球ひきあげ粘度計の球の種類

	半径 (cm)	表面積比	質量 (g)
A	0.95	1.00	28
B	1.42	2.23	93
C	1.91	4.04	224

定できるようにした。

また、ひきあげ速度は、無段変速器で0から1.1cm/sまで変えられるものとした。

## (2) 測定の方法

測定の対象としたフレッシュペーストおよびモルタルの配合は、予備実験の結果から、表3.3に示す21種類とした。配合要因としては、セメントの体積濃度  $v_c$  および全試料体積中の細骨材の体積濃度  $v_s$  ( $= \frac{s}{w+c+s}$ ) を使用した。

セメントは、比重3.15、ブレン値3 210cm<sup>2</sup>/gの普通ポルトランドセメントを用い、細骨材としては、豊浦標準砂を使用した。

練りまぜは、容量10ℓのモルタルミキサを用い、セメントと水を入れ低速で練りまぜながら30秒間で細骨材を投入し、その後30分間高速で練り、1分の休止の後1分30秒間高速で練りまぜた。また、試料の温度は20±2℃になるように練りまぜ水の温度を変えて管理した。

球ひきあげ粘度計による測定は、ひきあげ速度を0.1、0.4、0.7および1.0cm/sの4種、球の大きさは

前述した3種に変え、直径15cm、深さ30cmの円筒容器に試料を入れ、各条件での球に作用する抵抗力を測定した。球を定速でひきあげるときの抵抗力は、ひきあげ始めると同時に増加して行き、ピークをひ若干低下した後一定値に達するので、このときの値を抵抗力とした。測定は、注水後6分で開始し、ほぼ1分ごとに繰り返しながら3.3.3 (1)で述べるように性質が変化しないと考えられる注水後30分以内に終了するようにした。

また、JIS R5201に従ってフロー値を測定した。

すべての測定値は、日を変えて行った各2回の平均値とした。

## 3.3.3 実験結果およびその考察

### (1) 経過時間の影響

フレッシュペーストやモルタルは、注水後の時間の経過とともにその性質が変化することが知られている。そこで、注水後6分を始点として約1分おきに繰り返したフレッシュモルタルをニュートン流体と仮定したときの注水後の経過時間とStokesの法則の式(3.13)で求めた粘性係数との関係を図3.14に示す。図にみられるように、注水後30分程度までは、ほとんど同じ値と考えられる。これは、セメントと水との反応が、水と接した直後に激しく反応し、その後1時間程度の間単位時間当りの反応熱が減少する休眠時間があるということ<sup>3-29)</sup>および繰り返により軽微な水和構造は破壊されるためと考えられることから説明される。

したがって、注水後30分までは、かき混ぜながら測定を行えば、経過時間による影響は考えなくてよいことになり、以下本実験では、30分以内に測定を終了したのでこの影響については無視する。

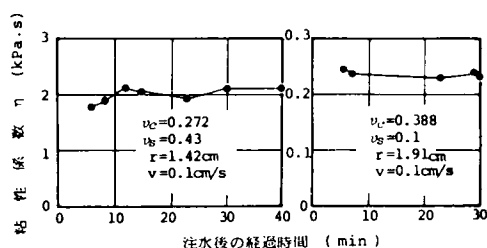


図3.14 フレッシュモルタルの注水後の経過時間と粘性係数との関係

## (2) フレッシュペーストおよびモルタルをニュートン流体と仮定することの適否

比較的軟らかいフレッシュペーストあるいはモルタルをニュートン流体と仮定できるかどうかについて検討するため、球のひきあげ速度および大きさを変えて粘性係数を求めた結果の1例を図3.15(a)に示す。この配合のフロー値は249であり、モルタルとしてはかなり軟らかいものである。

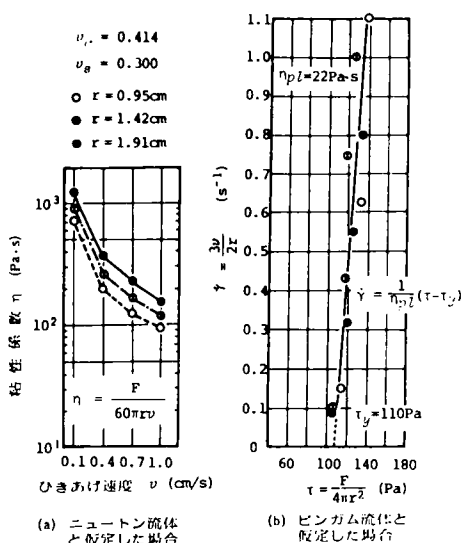


図3.15 球ひきあげ粘度計による測定結果例

図3.15(a)に見られるように、ひきあげ速度および球の大きさによって粘性係数は変化しており、ニュートン流体と仮定することはできない結果となっている。他の配合においても同様の傾向が得られている。

また、3.4で述べる平行板プラストメータI型による図3.15と同じ配合をビンガム物体と仮定して求めた塑性粘度は、表3.3に示すように15Pa·sであり、この図のニュートン流体と仮定したときの100~1000 Pa·sと大きく異なっている。

したがって、静止している比較的軟らかいフレッシュペーストやモルタルをニュートン流体と仮定することは、適当でない。そこで、次項では、球ひきあげ粘度計によるビンガム物体のレオロジー一定数の測定方法について検討する。

## 3.3.4 球ひきあげ粘度計のビンガム物体への適用

### (1) ビンガム物体中をゆっくり運動する球の受ける抵抗力

ビンガム物体中をゆっくり運動する球の受ける抵抗力は、球のまわりのビンガム物体が流動状態でありその速度分布がニュートン流体と同様であると仮定すると次のようになる。

ビンガム物体の流動している部分の応力成分  $\tau_{rs}$  は、

$$\tau_{rs} = \eta_{pl} \dot{e}_{rs} + \tau_y \quad (r, s = 1, 2, 3) \quad (3.14)$$

ここで、 $\dot{e}_{rs}$ ；ひずみ速度

$\eta_{pl}$ ；塑性粘度

$\tau_y$ ；降伏値

で表される。

一方、粘弾性体の応力とひずみの関係は、

$$\tau_{rs} = 2\gamma e_{rs} + 2\eta \dot{e}_{rs} + \left\{ \left( \kappa - \frac{2}{3} r \right) \varepsilon_v + \left( \eta_v - \frac{2}{3} \eta \right) \dot{\varepsilon}_v \right\} \delta_{rs} \quad (r, s = 1, 2, 3) \quad (3.15)$$

ここで、 $\gamma$ ；せん断弾性係数

$\kappa$ ；体積弾性係数

$\eta$ ；せん断粘性係数

$\eta_v$ ；体積粘性係数

$\varepsilon_v$ ；体積ひずみ  $\varepsilon_v = e_{11} + e_{22} + e_{33}$

$\delta_{rs}$ ；クロネッカーのデルタ

$$\begin{cases} r = s \text{ のとき } \delta_{rs} = 1 \\ r \neq s \text{ のとき } \delta_{rs} = 0 \end{cases}$$

であるから、式(3.15)に式(3.14)を代入し、ビンガム物体の流動している部分では、粘性のほかに体積弾性は示すが、せん断弾性は示さないの、 $\gamma = 0$  となり、静水圧  $\kappa \varepsilon_v = -p$  とおくと、

$$\tau_{rs} = 2\eta_{pl} \dot{e}_{rs} + 2\tau_y + \left\{ -p + \left( \eta_v - \frac{2}{3} \eta_{pl} - \frac{2\tau_y}{3\dot{e}_{rs}} \right) \dot{\varepsilon}_v \right\} \delta_{rs} \quad (3.16)$$

となる。運動方程式は、

$$\frac{\partial \tau_{ar}}{\partial x_a} + \rho B_r = \rho \dot{v}_r \quad (r = 1, 2, 3) \quad (3.17)$$

ここで、 $v_r = \frac{dv_r}{dt}$  で、 $v_r$  は変位速度、 $B_r$  は体積の成分、 $\rho$  は密度である。

また、連続の方程式は、非圧縮性であるので、

$$\text{div} V = 0,$$

降伏値  $\tau_y$  は、定数であるから、ビンガム物体の基礎方程式は、Navier-Stokes の方程式の  $\eta$  に塑性粘度  $\eta_{pl}$  を代入した

$$\eta_{pl} \nabla^2 v_r - \frac{\partial p}{\partial x_r} + \rho B_r = \rho v_r \quad (r = 1, 2, 3) \quad (3.18)$$

となる。Reynold 数  $[R]$  が小さく、遅い定常流では、慣性項  $\rho \dot{v}_r$  は無視でき、体積力も一般に小さいので、式(3.18)は、

$$\eta_{pl} \nabla^2 v_r - \frac{\partial p}{\partial x_r} = 0 \quad (r = 1, 2, 3) \quad (3.19)$$

となり、非圧縮性より  $\frac{\partial v_a}{\partial x_a} = 0$  を用いると Laplace の方程式

$$\nabla^2 p = 0 \quad (3.20)$$

が得られる。

したがって、ビンガム物体中をゆっくり運動する球の受ける抵抗力は、この Laplace の方程式を解けばよく、その境界条件として球の表面ですべらないことを用いる。

まず、図3.16に示すように座標をとる。粘性体中をゆっくり動く球に対しては Prandtle の解<sup>3-25)</sup>があり、ビンガム物体中を運動する場合も同様にして解くと、球の表面に働く圧力  $p$  の大きさは、球の速度を  $v$ 、半径を  $r$  とすると、

$$p = -\frac{3\eta_{pl} v x_1}{2r^2}$$

となり、図3.16の極  $P_1 (x_1 = -r)$  および  $P_2 (x_1 = r)$  での圧力は、それぞれ  $3\eta_{pl} v/2r$  および  $-3\eta_{pl} v/2r$  となる。 $x_1 = 0$  の環すなわち赤道上では圧力は0である。

一方、粘性による抵抗は、速度勾配に比例するせん断応力によって生ずる。半径  $r$  の球面上の速度勾

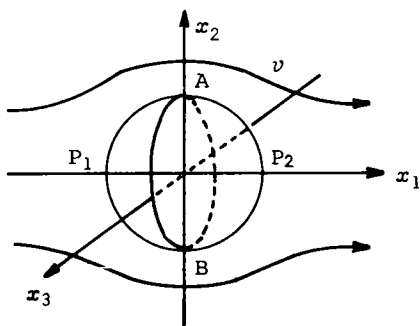


図3.16 球のまわりの流れ

配の成分は、

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_1}{\partial x_1} &= v \frac{3x_1}{2r^2} (1 - \frac{x_1^2}{r^2}), \quad \frac{\partial v_1}{\partial x_2} = v \frac{3x_2}{2r^2} \\ (1 - \frac{x_1^2}{r^2}), \quad \frac{\partial v_1}{\partial x_3} &= v \frac{3x_3}{2r^2} (1 - \frac{x_1^2}{r^2}) \\ \frac{\partial v_2}{\partial x_1} &= v \frac{3x_1}{2r^2} (-\frac{x_1 x_2}{r^2}), \quad \frac{\partial v_2}{\partial x_2} = v \frac{3x_2}{2r^2} (-\frac{x_1 x_2}{r^2}), \\ \frac{\partial v_2}{\partial x_3} &= v \frac{3x_3}{2r^2} (-\frac{x_1 x_2}{r^2}) \\ \frac{\partial v_3}{\partial x_1} &= v \frac{3x_1}{2r^2} (-\frac{x_1 x_3}{r^2}), \quad \frac{\partial v_3}{\partial x_2} = v \frac{3x_2}{2r^2} (-\frac{x_1 x_3}{r^2}), \\ \frac{\partial v_3}{\partial x_3} &= v \frac{3x_3}{2r^2} (-\frac{x_1 x_3}{r^2}) \end{aligned} \quad (3.21)$$

となる。

極においては、 $x_1 = \pm r$ ,  $x_2 = x_3 = 0$  であるから、これらの成分は0となる。ここに働く圧力は  $x_1$  方向に  $3\eta_{pl} v/2r$  であり、ビンガム物体の方程式  $\tau = \eta_{pl} \dot{\gamma} + \tau_y$  で  $\dot{\gamma} = 0$  であるから応力は  $\tau_y$  となる。したがって、極では  $3\eta_{pl} v/2r + \tau_y$  の抵抗力が働くことになる。

赤道においては、 $x_1 = 0$  であるから速度勾配は、

$$\frac{\partial v_1}{\partial x_2} = v \frac{3x_2}{2r^2}, \quad \frac{\partial v_1}{\partial x_3} = v \frac{3x_3}{2r^2}, \quad \text{他は } 0 \quad (3.22)$$

である。赤道上では圧力は0となり、AおよびB点での  $x_1$  方向の抵抗力は、 $3\eta_{pl} v/2r + \tau_y$  となる。

このようにして、球面上のすべての点で  $x_1$  方向に働く抵抗力は、 $3\eta_{pl} v/2r + \tau_y$  となるので、球の全表面積は  $4\pi r^2$  であるから、球の受ける全抵抗力  $F$  は、

$$F = 4\pi r^2 (\frac{3\eta_{pl} v}{2r} + \tau_y) \quad (3.23)$$

で与えられる。

## (2) ビンガム物体のレオロジー一定数の測定

以上のようにして導いた式(3.23)において、 $\dot{\gamma} = \frac{3v}{2r}$ ,  $\tau = \frac{F}{4\pi r^2}$  とおくと、式(3.24)は、

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{\eta_{pl}} (\tau - \tau_y) \quad (3.24)$$

となる。

したがって、異なった  $\dot{\gamma}$  すなわち球のひきあげ速度を変えたときの球に作用する抵抗力をいくつか求めてプロットすると、この関係式は直線となり、直線の勾配の逆数からビンガム物体の塑性粘度  $\eta_{pl}$ ,  $\tau$  軸との切片から降伏値  $\tau_y$  が求まることになる。

表3.3 球ひきあげ粘度計および平行板ブラストメータ I 型による測定結果

セメント体積濃度 $v_g$	0.559			0.514			0.476						0.442				0.414		0.388		0.366	
水セメント比 W/C	0.25			0.30			0.35						0.40				0.45		0.50		0.55	
細骨材体積濃度 $v_g$	0.10 0.20			0.10 0.20			0.05 0.10 0.15 0.20 0.30						0.20 0.25 0.30 0.35				0.30 0.35		0.35 0.40		0.40	
セメント比 C/S	1/0.2 1/0.4			1/0.2 1/0.4			1/0.1 1/0.2 1/0.3 1/0.4 1/0.7						1/0.5 1/0.6 1/0.8 1/1.0				1/0.8 1/1.1		1/1.2 1/1.4		1/1.5	
フロー値 (mm)	FL <sub>0</sub>	109	105	104	119	113	110	166	163	144	141	130	114	201	175	150	117	193	156	200	138	165
	FL <sub>15</sub>	151	129	127	190	185	172	229	242	228	210	209	183	251	232	216	206	249	223	251	215	228
みかけの粘性率 $\eta^*$ (Pa·s)	-	-	-	2230	3140	-	280	412	440	940	1060	-	258	443	760	-	340	608	123	1200	150	
球ひきあげ粘度計 $\tau_y$ (Pa)	-	-	-	-	-	-	108	167	255	294	-	-	108	157	-	-	108	284	128	-	196	
	$\eta_{pl}$ (Pa·s)	-	-	-	-	-	24	60	29	39	-	-	23	29	-	-	22	20	10	-	26	
平行板ブラストメータ $\tau_y$ (Pa)	3051	3267	4140	795	1016	2354	88	128	245	255	245	1226	98	157	383	912	88	245	49	5690	235	
	$\eta_{pl}$ (Pa·s)	706	6078	10000	64	69	564	22	16	26	31	24	130	13	23	53	108	15	19	8	131	30

この原理に基づき、前項3.3.3と同様にして球に作用する抵抗力を求め、式(3.24)を用いて、図3.15の(a)図を整理しなおして示すと図3.14の(b)図となる。このように、球の大きさやひきあげ速度の影響がなくなり、 $\dot{\gamma}$ の小さい範囲を除くとほぼ一本の直線となる。他の配合における測定結果も同様となるので、フレッシュペーストやモルタルはビンガム物体と近似でき、この方法でビンガム物体のレオロジー定数を測定できることになる。このようにして前項3.3.3と同一配合について測定した結果を表3.3に示す。

しかし、以上の方法の基礎式である式(3.23)は、前述(3.3.4 (1)参照)したような仮定のもとに導いており、球に付着して運動する試料がないすなわち球表面近くでせん断応力度 $\tau$ が降伏値 $\tau_y$ 以下になる部分は少ないとして無視し、球が動くことによる流動範囲も理論的には無限遠とするなどの近似を用いている。すなわち、降伏値による影響の一部を考慮し、一部を無視して式(3.23)を導いていることになる。この降伏値の影響をすべて考慮すると、

$$F = 12\pi r^2 \left( \frac{v}{2r} \eta_{pl} + \alpha \tau_y \right) \quad (3.25)$$

となる<sup>3)-30)</sup>この $\alpha$ は、 $N_2 = \frac{2r}{v} \frac{\tau_y}{\eta_{pl}}$ で定義されるビンガム数の関数であることが吉岡ら<sup>3)-31)</sup>によって示されている。吉岡らは、ビンガム物体中を球が運動するときの静止域と流動域の境界を仮定し、その上限と下限として、 $N_2 = 10^{-1} \sim 10^3$ に対して $\alpha = 10 \sim 0.8$ を与えている。また、Ansley は<sup>3)-32)</sup>ほぼ理想的なビンガム物体と考えられる粘土およびカオリンのサスペンションの塑性粘度および降伏値の実測値

および既往のデータを用いて整理し、実験的に $\alpha = \frac{7\pi}{24} \approx 0.92$ を与えている。

したがって、本研究の式(3.23)では、結果的に塑性粘度 $\eta_{pl}$ は、式(3.25)を用いた場合と同じ値を与えることになる。しかし、降伏値 $\tau_y$ は、式(3.25)の $\alpha$ として0.33を用いていることになり、フレッシュペーストやモルタルのビンガム数 $N_2 = 1 \sim 10^3$ の場合の $\alpha$ の値としては約 $\frac{1}{3}$ の大きさであり、式(3.23)で求めた値は、式(3.25)で $\alpha = 1$ としたときの3倍となっている。

また、表3.3に示した配合で、球ひきあげ粘度計による測定結果が空欄になっている部分は、試料が硬すぎて抵抗力が一定値にならなかったり、球の上方の試料が球とともに押し上げられたりして、測定理論の基本仮定を満足しないと考えられたものであり、フロー値では、220以下の配合となっている。

### 3.4.5 まとめ

以上述べてきたように、比較的軟らかいフレッシュペーストやモルタルでもニュートン流体と仮定することができないことが、球ひきあげ粘度計を用いて確認された。ビンガム物体と仮定した場合のレオロジー定数は、フロー値で220以上の配合であれば球ひきあげ粘度計で測定できる。著者の導いた測定基本式では、塑性粘度は正確な値を得ることができるが、降伏値は、より厳密に導いた測定基本式による値の約3倍の値を与えており、この点の修正が必要である。

また、この粘度計を、フレッシュコンクリートや振動を受けている場合についても適用してみたが、フレッシュコンクリートでは、球の大きさと粗骨材

の最大寸法との比を2倍程度にした場合には、球に粗骨材が当たり、X-Tレコーダーで記録した抵抗力は、一定値とならずこの比をもう少し大きくする必要がある。容器寸法も粗骨材の最大寸法の10倍程度では、球の上部に粗骨材のブリッジ構造ができ、球に非常に大きな抵抗力が作用し、測定理論の仮定を満足しない。フレッシュコンクリートを振動させた場合には、特に粗骨材の沈下により測定中に試料そのものが変化することになり、レオロジー定数を測定することは困難である。

その他の問題点として、試料中を球が通過したあとの球の後部に発生する空洞部分にまず最初に水あるいは水分の非常に多い物質が流れ込み、球のまわりの物質が均一でない可能性も考えられる。

このように、球ひきあげ粘度計をビンガム物体と近似したフレッシュモルタルやコンクリートのレオロジー定数を測定するためには、今後解決しなければならない問題点がある。

### 3.4 平行板プラストメータによる測定方法の検討

#### 3.4.1 はじめに

3.2で検討した回転粘度計、3.3で検討した球ひきあげ粘度計とともに、比較的やわらかい試料にしか適用できないことを指摘した。回転粘度計では、村田ら<sup>3-5)</sup>によれば、コンクリートではスランプ値12~15cm以上、球ひきあげ粘度計では、3.3.4で述べたようにモルタルでフロー値220以上といったものが対象となる。しかし、土木工事では、スランプ値で12~15cm以下の硬いコンクリートも多く扱っている。

このような硬い試料のレオロジー量を測定できる装置としては、平行板プラストメータが考えられる。

平行板プラストメータは、ゴムの弾塑性性質の測定に用いられているものであるが<sup>3-33)</sup>平行板プラストメータの流体力学的理論が進展し、他の分野にも利用されるようになっていく<sup>3-34)</sup>。

平行板プラストメータは、図3.17あるいは図3.18に示すような平行な2つの円板間に試料を入れ、一定荷重をかけてそのときの試料の高さとその時間的な変化とからレオロジー量を求めるものであり、図3.17に示すグッドリッチ型と図3.18に示すウィリアム

ス型とがある。適用できる物質としては、ニュートン流体、ビンガム物体、de Waele-Ostwald 流体である。また、生ずる変形は、作用させる荷重の大きさにもよるが、比較的遅いものである。

そこで、大きなせん断変形を与えず回転粘度計のように材料分離による壁効果の影響を少なくまた比較的硬い試料のレオロジー定数を測定することができる装置として図3.17に示すグッドリッチ型の平行板プラストメータを取り上げ、この装置のフレッシュモルタルおよびコンクリートへの適用性および測定方法について検討する。

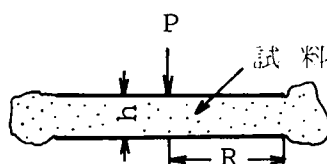


図3.17 グッドリッチ型プラストメータ

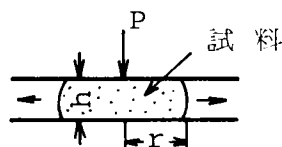


図3.18 ウィリアムス型プラストメータ

#### 3.4.2 平行板プラストメータの理論

3.2および3.3で述べたようにフレッシュモルタルやコンクリートは、ビンガム物体と近似できるので、以下ビンガム物体に対するグッドリッチ型の平行板プラストメータの理論について述べる。

平行板プラストメータの理論としては、Scott<sup>3-35)</sup>曾根<sup>3-36)</sup>および岡ら<sup>3-37,38)</sup>のものがあるが、Scottの式は近似が大きいので、一番近似の少ない岡らの理論を用いることとし、次に岡ら<sup>3-38)</sup>の理論を簡単に示す。

いま、試料を図3.19のように平行板間にはさみ、圧力 $P$ を加えたとし、

- (i) 物質が非圧縮性
- (ii) 流れはきわめて遅い
- (iii) 平行板と試料とは密着してすべらない



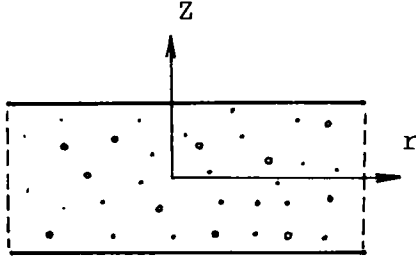


図3.19 平行板プラストメータの座標

(iv) 試料の厚みは直径に比してごく小さいという仮定を満足するとする。

平行板プラストメータの中心を座標の原点に選び、板面に垂直に  $z$  軸を図3.19に示すようにとり、円筒座標  $(r, \theta, z)$  を用いることとする。降伏値  $\tau_y$ 、塑性粘度  $\eta_{pl}$  のビンガム物体が流動している場合、応力-ひずみ関係を円筒座標を用いて表すと、

$$\left. \begin{aligned} \tau_{rr} &= -p + 2\eta_{pl} \frac{\partial v_r}{\partial r} \\ \tau_{\theta\theta} &= -p + 2\eta_{pl} \frac{v_r}{r} \\ \tau_{zz} &= -p + 2\eta_{pl} \frac{\partial v_z}{\partial z} \\ \tau_{\theta z} &= \tau_y \\ \tau_{zr} &= \eta_{pl} \left( \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \tau_y \\ \tau_{r\theta} &= \tau_y \end{aligned} \right\} \quad (3.26)$$

ただし、 $\tau_{rr}$ ,  $\tau_{\theta\theta}$ ,  $\tau_{zz}$ ,  $\tau_{\theta z}$ ,  $\tau_{zr}$ ,  $\tau_{r\theta}$  は応力成分で、 $v_r$ ,  $v_\theta$ ,  $v_z$  は速度成分、 $p$  は静水圧で表される。プラストメータの板面距離が、円板の直径に比べて充分小さい場合に限ると、 $\frac{\partial v_r}{\partial r} \approx 0$  と考えられるから、 $\tau_{rr} = -p$  となる。図3.20において斜線をつ

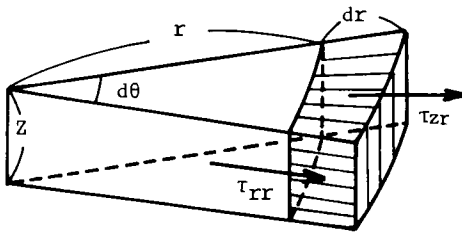


図3.20 微小要素の力のつり合い

けた部分の力のつりあいを考えれば、

$$\begin{aligned} prd\theta - \{prd\theta z + \frac{\partial}{\partial r}(prd\theta z) dr\} + \tau_{zr}rd\theta dr \\ = 0 \end{aligned} \quad (3.27)$$

が成立し、せん断応力  $\tau_{zr}$  は、次のようになる。

$$\tau_{zr} = -\frac{z}{r} \frac{\partial}{\partial r}(pr) = -\frac{z}{r} (pr)' \quad (3.28)$$

降伏値  $\tau_y$  が  $\tau_{zr}$  より小さいときに試料は流動するから、もっとも小さい  $z$  の値は、

$$z = \frac{\tau_y r}{(pr)'} \quad (3.29)$$

となる。 $\tau_y$  は定数であるから、ビンガム物体の流動している部分に対しては、Navier-Stokes の式をそのまま適用することができる。

平行板プラストメータでは、速度は充分小さいので2乗の項は無視できるので、次のように簡単になる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial r} &= \eta_{pl} \nabla^2 v_r \\ \frac{\partial p}{\partial z} &= \eta_{pl} \nabla^2 v_z \end{aligned} \right\} \quad (3.30)$$

式(3.30)の第2式から、

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \eta_{pl} \nabla^2 v_z = \eta_{pl} \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \quad (3.31)$$

が得られる。

平行板距離が充分小さいとき  $v_z$  は小さく、式(3.31)の右辺は0に等しい。したがって、 $p$  は  $z$  に無関係となり、式(3.30)の第1式は、

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \eta_{pl} \left( \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right) \quad (3.32)$$

となる。 $\frac{\partial v_r}{\partial r}$  は  $\frac{\partial v_r}{\partial z}$  に対して無視できるから、

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \eta_{pl} \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \quad (3.33)$$

となり、式(3.29)において  $\frac{\partial v_z}{\partial z}$  は、 $z = -\frac{\tau_y r}{(pr)'}$  で 0 となるから、式(3.33)に代入して  $z$  について積分すると、

$$v_r = \frac{p'}{2\eta_{pl}} z^2 + \frac{\tau_y r p'}{\eta_{pl} (pr)'} z + C \quad (3.34)$$

が得られる。ただし、 $p'$  は  $\frac{dp}{dr}$  を意味する。

板面では、ビンガム物体と平行板との間にすべりはないと考えるから、 $v_r$  は  $z = \frac{h}{2}$  で 0 となる。このことより  $C$  が求まり、 $v_r$  は次式となる。

$$v_r = \frac{p'}{2\eta_{pl}} (z^2 - \frac{h^2}{4} + \frac{\tau_y r}{\eta_{pl}} \frac{p'}{(pr)'} (z - \frac{h}{2})) \quad (3.35)$$

次に、連続の式

$$\frac{\partial}{\partial r}(rv_r) + \frac{\partial}{\partial z}(rv_z) = 0 \quad (3.36)$$

から、 $\dot{h} = \frac{dh}{dt}$  に関する式を導く。式(3.36)を  $z$  について  $-\frac{h}{2}$  から  $\frac{h}{2}$  まで、すなわち平行板間で積分すれば、

$$h^3 \{ (pr)' \}^3 p' - 6\eta_{pl} \dot{h} r \{ (pr)' \}^3 + 3\tau_y h^2 r p' \{ (pr)' \}^2 - 4\tau_y^3 r^3 p' = 0 \quad (3.37)$$

あるいは、

$$6\eta_{pl} r (p'r + p)^3 \dot{h} = p' \{ h(p'r + p) - \tau_y r \} \{ h(p'r + p) + 2\tau_y r \}^2 \quad (3.38)$$

が得られる。

$p$  を  $r$  の関数として求めるため、 $p = C + \psi \frac{dh}{dt} + \chi \tau_y$  とおき、 $\psi$  を求めるため、 $\tau_y = 0$  とおいて  $\psi = \frac{3\eta_{pl} r^2}{h^3}$  を得、 $h = \frac{dh}{dt} = 0$  とおいて、 $p = -\frac{\tau_y r}{h}$  を得  $\chi = -\frac{r}{h}$  となる。したがって、

$$p = C + \frac{3\eta_{pl} r^2}{h^3} \dot{h} - \frac{\tau_y r}{h} \quad (3.39)$$

となる。いま、大気圧を  $p_o$  で表せば、

$$p_o = C + \frac{3\eta_{pl} R^2}{h^3} \dot{h} - \frac{\tau_y R}{h} \quad (3.40)$$

式(3.39)から式(3.40)を引くと、

$$p - p_o = -\frac{3\eta_{pl}}{h^3} \dot{h} (R^2 - r^2) + \frac{\tau_y}{h} (R - r) \quad (3.41)$$

となる。

平行板に働く力のつりあいから、円板に作用する外力を  $F$  とすると、

$$\int_0^R p 2\pi r dr = F + \pi R^2 p_o \quad (3.42)$$

式(3.41)を式(3.42)に代入すると、

$$-\frac{3\pi R^4}{2h^3} \eta_{pl} \dot{h} + \frac{\pi R^3 \tau_y}{3h} = F \quad (3.43)$$

となり、試料が平行板からはみ出すグッドリッチ型の場合、平行円板の半径を  $a$  とすると、 $R = a$  において、

$$-\frac{3\pi a^4}{2h^3} \eta_{pl} \dot{h} + \frac{\pi a^3 \tau_y}{3h} = F \quad (3.44)$$

いま、

$$\left. \begin{aligned} \dot{\gamma} &= -\frac{9}{2} \frac{a}{h^2} \dot{h} = -\frac{9}{2} \frac{a}{h^2} \frac{dh}{dt} \\ \tau &= \frac{3hF}{\pi a^3} \end{aligned} \right\} \quad (3.45)$$

とおけば、式(3.44)は、

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{\eta_{pl}} (\tau - \tau_y) \quad (3.46)$$

となる。

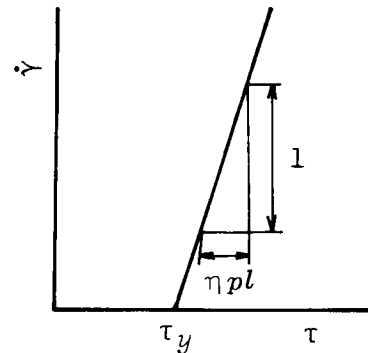


図3.21 平行板プラストメータによるコンシステンシー曲線

したがって、ビンガム物体のレオロジー定数を求めるためには、2枚の平行円板間に試料を入れ、平行板に一定荷重を載荷し、そのときの試料高さと試料高さの時間的変化を測定し、式(3.45)を用いて $\dot{\gamma}$ および $\tau$ を計算し、図3.21のようなコンシステンシー曲線をプロットすることによって、直線の勾配の逆数から塑性粘度 $\eta_{pl}$ 、 $\tau$ 軸との切片から $\tau_y$ が求まる。

### 3.4.3 実験の方法

#### (1) 平行板ブラストメータ

前項で述べた理論によってビンガム物体と仮定したフレッシュペースト、モルタルおよびコンクリートのレオロジー定数を測定する装置として、図3.22に示すペーストおよびモルタル用のI型と、図3.23および図3.24に示すコンクリートまでに適用できるIII型との2種類の平行板ブラストメータを試作した。

平行板ブラストメータとしては、次の条件を満足していなければならない。

- (i) 測定理論式において仮定した条件を満たすため試料の直径と高さの比が大きいこと(10以上)
- (ii) 試料を均一材料として扱えるだけの試料の

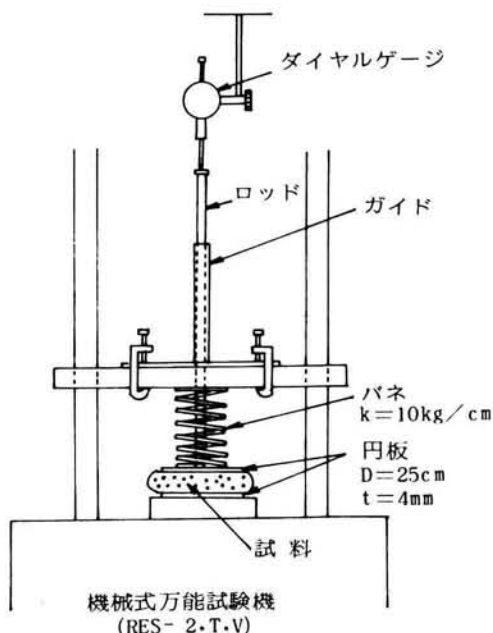


図3.22 平行板ブラストメータI型 (ペースト、モルタル用)

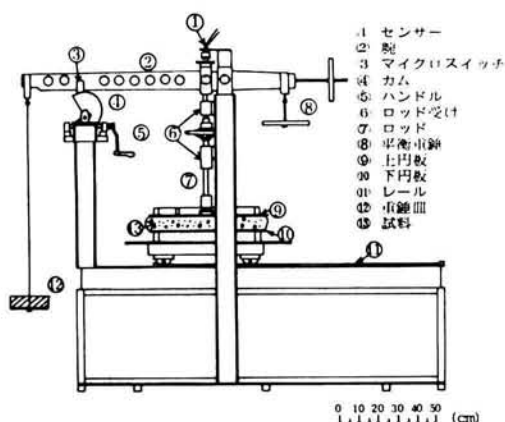


図3.23 平行板ブラストメータIII型 (ペースト、モルタル、コンクリート用)

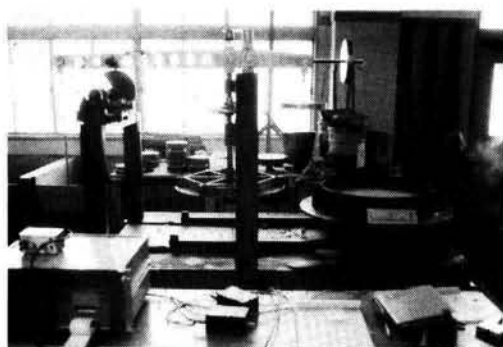


図3.24 平行板ブラストメータIII型

最小寸法が確保されていること

- (iii) 一定荷重を試料に載荷できること

そこで、試料の直径と高さの比は10以上とし、試料の最小寸法は、試料に含まれる最大粒子径の4倍程度とした。ペーストおよびモルタル用のI型では、図3.22に示すように、平行円板の直径を25cm、試料高さを約1.5cmとし、荷重はばねを介して容量2tの機械式万能試験機で載荷できるようにした。試料高さおよび高さ変化は、 $\frac{1}{100}$ mm読みのダイヤルゲージで目視で読みとれるものとした。

図3.23および図3.24に示すIII型では、ペーストおよびモルタル用として、平行円板直径30cm、試料高さを約3cm、コンクリート用として、骨材の最大寸法と試料の最小寸法との比による影響を調べるため平行板の直径を60cmおよび80cmの2種、試料高さは約6cmおよび8cmとした。載荷は、てこ式とし、載荷重錘の10倍の力が作用するようにし、最小約10N

表3.4 平行板プラストメータⅢ型の性能の検討

円板内径 (cm)	30	60	80
試料高さ (cm)	約 3	約 6	約 8
$\nu_a$ (W/C)	0.40 (0.48)		
$\nu_g$ (C/S)	0.50 (1/2.1)		
$\nu_g$ (s/a %)			
0 (100)	●	●	●
0.05 (90)		○	
0.10 (82)		○	
0.15 (74)		○	
0.20 (67)		●	
0.25 (60)		○	
0.30 (54)		●	●
0.35 (48)		●	●
0.40 (43)		○	○

注) ● 荷重を3種に変化させて各荷重で3回測定  
○ 荷重1種で3回測定

から最大約10kNまで変えられるようにした。平行円板に作用する荷重は、ロードセルを用いてキャリブレーションを行った。試料高さおよび高さ変化は、非接触型変位計およびデジタルプリンタを用いて、0.4秒間隔で $\frac{5}{1000}$ mmまで読み取れるようにした。

## (2) 実験計画

測定方法および測定精度について検討するため、2つのシリーズに分けて実験を行った。

シリーズⅠは、平行板プラストメータⅠ型を用いたもので、平行板プラストメータのフレッシュペーストおよびモルタルへの適用性および球ひきあげ粘度計で測定された値と比較しその測定精度について検討するため球ひきあげ粘度計に用いたものと同じ材料および配合とした。測定した配合は、表3.3に示す。

シリーズⅡは、Ⅲ型の平行板プラストメータの測定方法および測定値の再現性を検討するため、表3.4に示す実験計画とした。測定方法の検討においては、試料高さの影響を調べるためモルタルに対しては高さを3種、コンクリートに対しては、粗骨材の最大寸法を15mmとしたため、約6cmと約8cmの2種に変えた。また、載荷重の大きさすなわち変形速度の影響を検討するため、載荷重の大きさは3種とした。

測定値の再現性については、同一配合、同一測定条件について日を変えて3回測定し比較検討した。

## (3) 使用材料および練り混ぜ

シリーズⅠでは、3.2.2(2)で述べた球ひきあげ粘

度計に関する実験に用いたものと同一の使用材料および練り混ぜ方法を使用した。

シリーズⅡでは、比重3.17、ブレン値3 110cm<sup>2</sup>/gの普通ポルトランドセメント、比重2.64、吸水率1.40%、粗粒率2.90の川砂を用いた。粗骨材は、比重2.60、吸水率1.74%、最大寸法15mmで粗粒率6.29の砂岩碎石を用いた。碎石は、粒度管理を行うため5～10mm、10～13mmおよび13～15mmにふるい分けたものを質量比で6:2:2に混合して使用した。モルタルおよびコンクリートの練り混ぜは、容量50ℓの山中式強制練りミキサで、細骨材、セメント、粗骨材の順に投入し、水を入れながら回転させ、全材料投入後3分間練り混ぜた。試料は、測定条件に応じて25ℓあるいは50ℓとした。

練り上がり温度は、シリーズⅠ、Ⅱとも練り混ぜ水の温度を調節して20±2℃になるようにした。

## (4) コンシステンシーの測定

モルタルは、JIS R5201に従ってフロー値、コンクリートは、JIS A1101に従ってスランプ値を測定した。シリーズⅡでは、モルタルのスランプ値も測定した。測定は、同一試料について2回行った。

## (5) 平行板プラストメータによる測定

### (i) 平行板プラストメータⅠ型による測定

上、下円板より直径で5mm大きい型わくを下円板のまわりにセットし、練り上ったモルタルをコテで目に見える程度の空隙が残らないように締め固め成形し、型わくを除いた後ばねを介して所定荷重を載荷した。載荷する荷重の大きさは、試料のコンシステンシーに応じて変化させ、測定開始時の試料高さが1.5cm前後になるようにした。なお、荷重の大きさは、ほとんどのものが200～400Nであり、荷重の変動幅は±5Nであった。

試料高さは、 $\frac{5}{1000}$ mm読みダイヤルゲージを用いて、所定の高さに達したときの試料高さを $h_0$ 、時間を0として、初めの30秒間は5秒間隔、その後1分までは10秒間隔で読み取った。また、測定開始は、注水後約8分とした。

測定は日を変えて2回行い、その平均を測定値とした。

### (ii) 平行板プラストメータⅢ型による測定

図3.24に示すように平行円板直径より1cm直径の大きい型わくをセットし、Ⅰ型の場合と同様に目に見える程度の空隙がないようにコテで試料を締め固め、

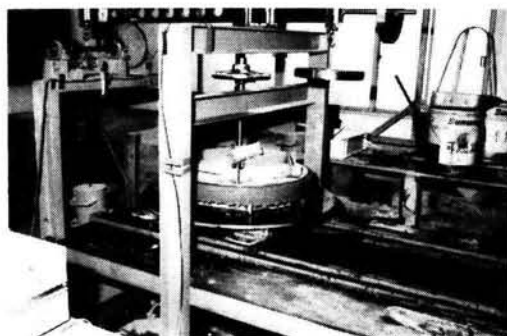


図3.25 平行板プラストメータⅢ型による測定状況

表面を平滑に仕上げた。型わくをしたままレール上を移動させ上円板の真下に試料をセットし、型わくをはずした後所定の荷重を載荷した。その状況を図3.25に示す。

荷重としては、試料高さの最初の変形量が0.2～0.4mm/s程度になるような基準荷重を決定し、その0.5および1.5倍の3種に変えた。なお、スランプ値と基準荷重とは密接な関係があり、実験ではこれを利用した。

試料高さは、毎測定日の最初に高さが既知のブロックを平行板間にはさみ、そのときの出力を記録し、これと間隙—出力関係式から求めた。

なお、試料高さは、図3.23の载荷腕の支持カムをハンドルでまわし、腕がカムを離れ荷重が試料に载荷された少し後に、変位計出力の記録用プリンターが自動的に始動し、0.4秒間隔で記録するようにした。

また、測定開始は、注水後約8分の一定とした。

#### (6) レオロジー定数の求め方

試料高さの時間に対する変形曲線を2次曲線と仮定し、前述の(5)で求めた各測定時の試料高さ $h_n$ から、平行板プラストメータの基礎式の式(3.45)および式(3.46)の $h$ および $\dot{h}$ は次式で求めた。

$$h = h_{n+1} + 0.4(h_n - h_{n+1}) \quad (3.47)$$

$$\dot{h} = -\frac{h_n - h_{n+1}}{0.4} \quad (3.48)$$

ただし、 $h$ は隣り合う測定時における試料高さの平均値、 $\dot{h}$ は隣り合う測定時間(0.4秒間)の試料高さの変化率である。

また、载荷重 $F$ は、载荷重錘と平板に作用する荷重との関係をキャリブレーションを行って求め、そ

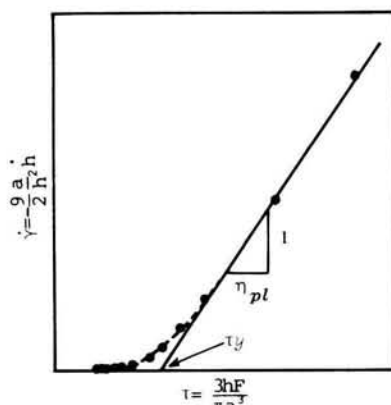


図3.26 平行板プラストメータによる測定結果の1例

の値を用いた。

これらを使用して、式(3.45)の $\dot{\gamma}$ および $\tau$ を計算し、図3.26に示すようなコンシステンシー曲線を求め、その直線部分の勾配の逆数から塑性粘度 $\eta_{pl}$ および $\tau$ 軸との切片から降伏値 $\tau_y$ を求めた。

### 3.4.4 実験結果およびその考察

#### (1) コンシステンシー曲線

平行板プラストメータⅠ型およびⅢ型を用いて求めたフレッシュベースト、モルタルおよびコンクリートのコンシステンシー曲線の1例を図3.26に示す。

この図に見られるようにベースト、モルタルおよびコンクリートとも完全なビンガム物体でないことが示されており、前述の回転粘度計および球ひきあげ粘度計での比較的硬い試料の場合と同様の結果となっている。しかし、図3.26に示されているように、モルタルやコンクリートをビンガム物体と近似し、そのレオロジー定数を用いて、フレッシュコンクリートなどの性質を表すことは十分可能であると考えられる。

#### (2) 球ひきあげ粘度計による測定値との比較

フレッシュベーストおよびモルタルをビンガム物体と仮定し、平行板プラストメータで測定したレオロジー定数の信頼性を検討する1つの方法として、同一材料、同一配合を用いた試料を前節3.3で述べた球ひきあげ粘度計で求めたものと比較検討する。

これらの結果は、いずれも2回の測定値の平均であり、その値を表3.3に示す。測定数は多いとはいえ

ないが、この表に見られるように、両装置で求められた測定値は、3.4.4 (6)で後述するように、平行板プラストメータでの測定値には若干の誤差を含んでいるものの、よく似た値となっている。

したがって、平行板プラストメータでフレッシュペーストおよびモルタルをビンガム物体と近似したときのレオロジー定数である塑性粘度  $\eta_{pl}$  および降伏値  $\tau_y$  を求めることができる。

### (3) 載荷荷重の大きさによる影響

平行板プラストメータの測定基本式によると、流動がきわめて遅いという条件を満足していると、平行円板に作用させる一定外力の大きさは、レオロジー定数に影響しない。しかし、本項(1)で述べたようにコンシステンシー曲線は、完全なビンガム物体の直線とならず、 $\dot{\gamma}$  の小さい部分で  $\tau$  軸に対して図3.26に示すように凸になっている。また、モルタルやコンクリートは、大小様様な粒子を含み荷重の大きさによってはその流動が滑らかでないことも考えられる。したがって、試料に載荷する荷重の大きさすなわち  $\dot{\gamma}$  の大きさによって求められるコンシステンシー曲線の部分が異なり、レオロジー定数も異なってくることが考えられる。

そこで、最初の変形量が0.2~0.4mm/sになるような荷重を選び、これを基準荷重として、この0.5倍および1.5倍の荷重の3種類を載荷したときのレオロジー定数をIII型の平行板プラストメータを用いて求

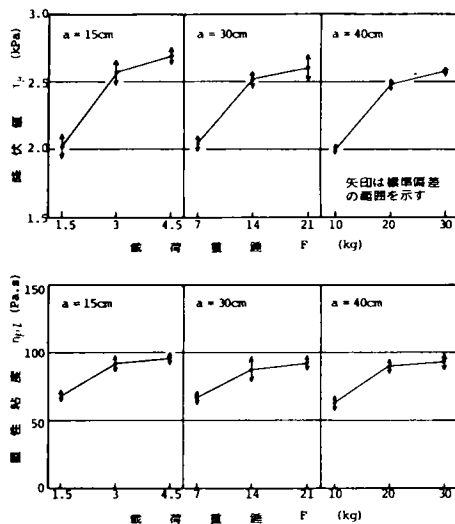


図3.27 モルタルのレオロジー定数に及ぼす載荷重の影響

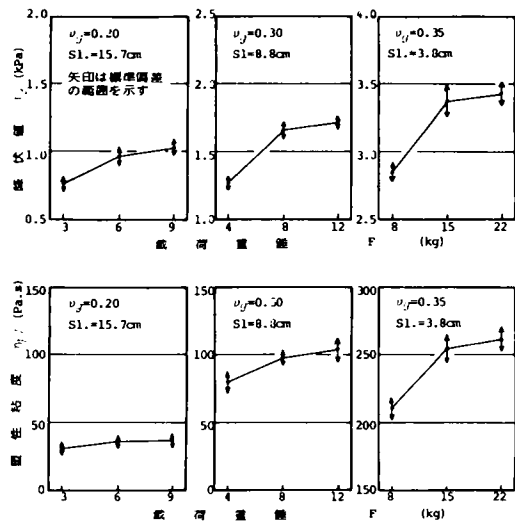


図3.28 コンクリートのレオロジー定数に及ぼす載荷重の影響

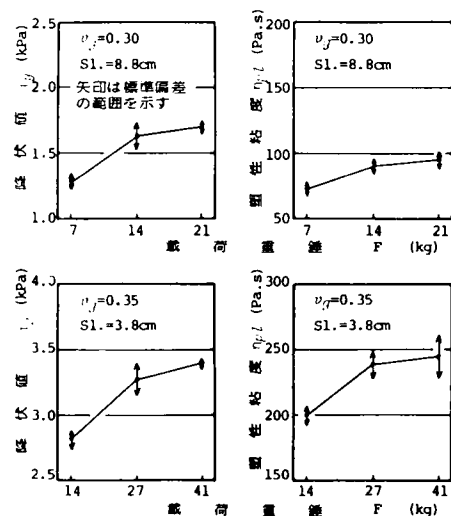


図3.29 コンクリートのレオロジー定数に及ぼす載荷重の影響

め、その結果を図3.27、図3.28および図3.29に示す。これらの図には、各条件における3回の測定値の平均値および標準偏差を示す。

いずれの場合も同様の傾向を示しており、載荷重錘の大きい方が、レオロジー定数も大きくなっている。その増加の割合は、図中の中心の重錘である基準荷重よりも小さくした方が大きく、基準荷重よりも大きくしたものがその影響は小さくなっており、基準荷重の場合と大差ないと考えられる。

このように、荷重が小さいと塑性粘度  $\eta_{pl}$ 、降伏値

$\tau_y$ とも小さくなっている理由として、降伏値は図3.30に示したように、載荷重が小さいため $\dot{\gamma}$ の小さい部分のコンシステンシー曲線を測定することになり、直線部分の延長と $\tau$ 軸との切片で与えられる $\tau_y$ が小さくなることが考えられる。しかし、この場合には、塑性粘度 $\eta_{pl}$ は降伏値 $\tau_y$ とは逆に大きくならなければならないが、図3.27～図3.29に示されているように小さくなっている。これは、荷重が小さいとコンクリートの流動が小さく、流動が骨材あるいは粗骨材の間の流動しやすい部分のみでほとんど生じるだけでよいが、荷重が大きくと変形が大きくなると骨材粒子が接触し、その接触によって流動抵抗が大きくなり、みかけ上塑性粘度 $\eta_{pl}$ が大きくなると考えることもできる。

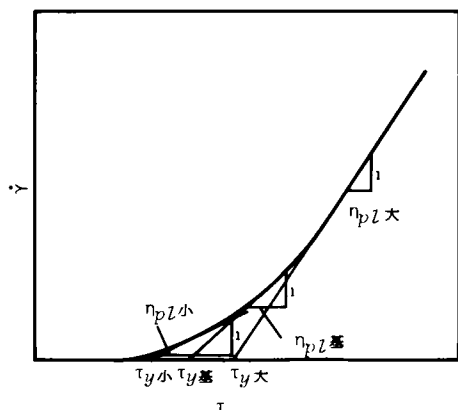


図3.30 コンシステンシー曲線の測定部分の違いによるレオロジー定数の相違

以上述べたように載荷重の大きさによって、測定されるレオロジー定数は異なるが、図3.27～図3.29に示されているように、基準とした荷重を用いれば、それより大きい荷重すなわち試料が均一材料として全体に流動している可能性の大きい場合の値と大差なく、荷重を大きくすると試料高さが低くなり、粒子の最大寸法の3倍近くまでに小さくなる。したがって、本実験では、Ⅲ型の平行板プラストメータによる測定における荷重の大きさは、試料のコンシステンシーによって変え最初の高さの変形速度が0.2～0.4mm/sになるものとする。

#### (4) 試料高さの影響

試料の高さが低くなるすなわち試料高さと試料中

の粒子の最大寸法との比が小さくなると、試料の流動が均一材料と見なせなくなることが考えられる。

そこで、モルタルの場合は、Ⅲ型の平行板プラストメータを用いて試料の高さを約3cm、約6cmおよび約8cmすなわち平行円板半径を15cm、30cmおよび40cmの3種に変えて、同一配合の試料についてレオロジー定数を測定した。基準の載荷重とした場合の結果の1例を円板半径との関係で示すと、図3.31となる。

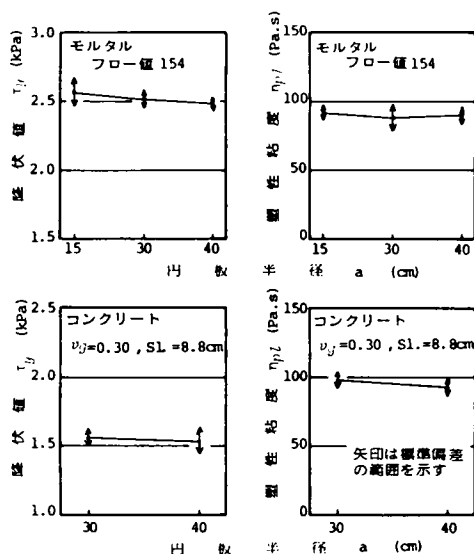


図3.31 試料高さの違いがレオロジー定数に及ぼす影響

この図に見られるように、円板半径の違いは、レオロジー定数に大きな影響を与えていないし、矢印で示した標準偏差の大きさをも考慮して判断すると、この程度の差であれば、どの寸法の円板すなわちどの試料高さをを用いてもよいと考えられる。したがって、測定のしやすさを考慮すると、モルタルでは平行円板半径15cmすなわち試料高さを約3cmとするものを用いて測定できる。

コンクリートの場合には、図3.31に1例を示すようになり、円板半径が30cmすなわち試料高さが約6cmの方が約8cmの場合よりわずかに大きなレオロジー定数を与えており、粗骨材同士の接触による流動抵抗の増加の影響が考えられ、他の配合の場合も同様の結果となっている。しかし、図3.31に示されている程度の差は、測定値の標準偏差の大きさを考え

と無視できる。したがって、測定のしやすさを考慮すると、半径30cmの平行円板すなわち試料高さ約6 cmのものをを用いて測定できる。

#### (5) レオロジー定数の測定値の再現性

各種の測定装置においては、その測定値の再現性が問題となる。そこで、各配合について各々の条件に対して日を変えて3回測定した結果の平均値と測定値の標準偏差の大きさを、図3.27～図3.29および粗骨材の体積濃度を横軸として図3.32に示す。

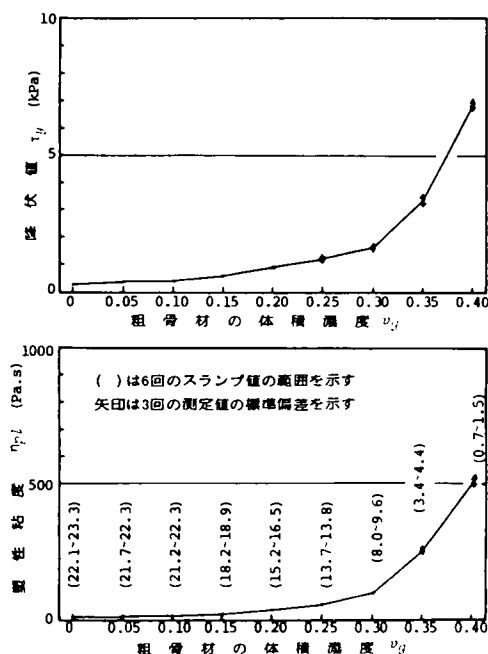


図3.32 平行板プラストメータⅢ型による測定値の再現性

モルタルの場合は、図3.27に示したような結果であり、標準偏差の大きさは降伏値で37～137Pa、塑性粘度で6～14Pa·sであり、変動係数では降伏値で1.4～5.6%、塑性粘度で6.1～13.4%となっており、降伏値では3～5%、塑性粘度では7～8%の範囲のものが多い。このように、塑性粘度の測定値の再現性が若干悪いが、全体的にいえばかなりよい再現性を持っていると考えられる。

コンクリートの場合は、図3.28および図3.29に示したような平均値と標準偏差が得られており、その標準偏差の値は、降伏値で19～177Pa、塑性粘度で1.0～4.1Pa·sとなっており、変動係数では降伏値で1.0～7.1%の範囲で4～5%のものが多く、塑性粘度

で5.3～18.9%で6～9%の範囲のものが多いが、12～19%のものも22ケース中4以上に当たる6ケースある。

モルタルの場合と比べると降伏値、塑性粘度ともにコンクリートの方が再現性は悪くなっている。降伏値と塑性粘度では、モルタルの場合と同様に塑性粘度の測定値の再現性の方が降伏値よりも悪くなっており、大きな違いを示すものも約4と多い。このように塑性粘度の測定値の再現性が悪いのは、コンシステンシー曲線の直線部を決定するときの測点数が3～4個と少ない場合もあり、また直線範囲の決定に個人差が入ることがその理由の1つであると考えられる。モルタルよりコンクリートの方の再現性が悪く、変動係数が9%以上になっているのは、試料高さが約6 cmで、粗骨材量が20～35%と多くスランプ値の小さい場合であり、粗骨材粒子間の接触抵抗により滑らかな流動が阻害されていることも一因であろう。

しかし、図3.32に示すように広い範囲の配合のレオロジー定数の測定値の再現性の目安となる標準偏差の大きさは、配合の違いによるレオロジー定数の大きさの差に比べて非常に小さい。したがって、本測定方法による測定値の再現性は、フレッシュモルタルやコンクリートのレオロジー定数を求めるために十分であり、よい測定精度であるといえる。

#### (6) 平行板プラストメータの適用性

平行板プラストメータでは、図3.25に示すように試料が自立する必要がある。したがって、図3.33のように試料が円板の外周近くでは崩れ、上円板と試料とが接しない場合がある。

モルタルでは、表3.3に示したようにフロー値250の試料まで測定しているが、この場合には試料が外周付近で上円板と接していない部分がある。表3.3では、この部分の面積が円板の全面積に対して10数%以下であり、無視しているが、正確な値を求めるためにはこの影響を考慮しなければならない。

逆に、試料と上円板とがほぼ全面接触しているのは、試料高さが約1.5cmのⅠ型ではフロー値が220程度以下、試料高さが約3cmのⅢ型では約200以下となっている。これは、フロー試験において底面内径10cm、高さ6 cmのフローコーンを取り去った直後のモルタルの拡がり測定した静定フロー値がそれぞれ約140および120に相当し、ほぼ自立している場合と考



えられる。

したがって、本研究で用いた平行板プラストメータでペーストやモルタルのレオロジー定数を測定するには、I型でフロー値220程度以下、III型では約200以下の試料が適する。しかし、若干の誤差を含むことを前提にすれば、フロー値で10～20程度大きい試料にも適用できる。

コンクリートでは、図3.32に示したようにスランプ値23.3cmのものまでの試料をIII型を用いて測定しているが、この場合は、図3.33に示したように外周近くの試料が流れ、外側から数cm位上円板と接していないことが観測されている。したがって、図3.32に示したスランプ値の大きい試料のレオロジー定数にはかなりの測定誤差を含んでいる。上円板と試料がほぼ全面で接するのは、試料高によって若干異なり、約6cmの場合はスランプ値が15cm程度以下、約8cmの場合は約12cm以下となっている。しかし、この場合、コンクリートがくずれやすい配合であるとか試料成形用の型わくのはずし方によっては、外周部がくずれることもあり、正確なレオロジー定数を求めるためには前述のスランプ値よりも2～3cm程度小さいものがよい。

したがって、フレッシュコンクリートのレオロジー定数をIII型の平行板プラストメータで測定できる試料としては、円板半径30cmすなわち試料高さ約6cmとするときには、若干の誤差を許す場合にはスランプ値15cm程度以下であり、正確な値を要求する場合には、これより更に2～3cmスランプ値の小さいものでなければならない。しかし、スランプ値17, 8cmのコンクリートでも測定誤差を認めるならば適用可能であると思われる。



図3.33 スランプ値20cmの試料の測定状況

### 3.4.5 まとめ

回転粘度計や球ひきあげ粘度計で測定できないような硬いフレッシュモルタルやコンクリートをビンガム物体と仮定して、そのレオロジー定数を測定する装置としては平行板プラストメータを用いることができる。

コンシステンシー曲線は、 $\dot{\gamma}$ の小さいところで曲線状になるので測定時に作用させる $\dot{\gamma}$ の大きさすなわち試料に載荷する荷重の大きさによってレオロジー定数が異なるが、ある荷重より大きくすればこの影響を少なくすることができるので、測定に際しては、適切な荷重の大きさを選択する必要がある、本研究の結果では、最初の変形速度が0.2～0.4mm/s位が適当である。

また、試料の最小寸法すなわち試料高さは、試料中に含まれる粒子の最大寸法の4～5倍程度以上は必要である。

測定値の再現性は、塑性粘度の方が降伏値よりも悪いが、若干の例外を除くと変動係数で10%以下であり、ほとんどのものは数%以内であるので、十分な再現性を持つといえる。

測定できる試料は、比較的硬いコンシステンシーを持つものでなければならず、モルタルでフロー値200以下、コンクリートでスランプ値12cm以下が適当である。しかし、若干の測定誤差を許す場合には、これより2～3cm大きいスランプ値の試料にも適用できる。

## 3.5 Raised Cosine Pulse 法による測定方法の検討

### 3.5.1 はじめに

以上述べてきた3種の測定方法は、いずれも静的測定方法に属し、試料に大きな外乱を与えて流動させその時の流動特性を測定する方法である。したがって、これらの方法は、測定対象の物質の内部構造が弱い場合にはその構造を破壊し、回復速度より破壊速度の方が大きい場合には、構造が破壊された状態での物性しか測定できない。一方、内部構造を破壊することなく物質の性質を測定することは、その内部構造を検討するために必要である。モルタルやコンクリートの硬化過程などを調べるには、その構造を破壊することなく物性を測定する必要がある。

このような条件を満足するものとして、動的な測定方法がある。フレッシュモルタルやコンクリートを対象として、動的な測定方法について研究したものとしては、角田らの共振法<sup>3-8)</sup>やパルス波の伝播状況より<sup>3-9~13)</sup>動的粘弾性率、粘性率、遅延時間、音速、減衰係数などを配合を変えて求めたもの、川東らの<sup>3-39)</sup>R.C.P.法を用いた高性能減水剤を添加したセメントペーストに関するもの、二重円筒型のねじり振動による Bergström<sup>3-40)</sup>の減衰状況による締固め状態に関するもの、角田らの<sup>3-41,42)</sup>リサージュ図形による経時変化などについて調べたものなどがある。しかし、この面での研究結果は少なく、その測定方法も確立していない。

そこで本研究では、大きな外乱を与えることなくまた広い周波数域にわたってその粘塑弾性的性質を求められるものであり、すでに構成されている構造の破壊を極力少なくしてその時間的な変化も測定できる磯田ら<sup>3-43)</sup>の開発した Raised Cosine Pulse 法(以下 R.C.P.法という)をフレッシュモルタルおよびコンクリートへ適用する方法について検討する。

### 3.5.2 Raised Cosine Pulse 法の測定理論<sup>3-43)</sup>

物質の粘弾性的性質を記述するときしばしば用いられる粘弾性関数の一つは、複素弾性率  $G^*(i\omega)$  ( $= G'(\omega) + iG''(\omega)$ ) である。

いま正弦ひずみを  $\gamma(t) = \gamma_0 e^{i\omega t}$ 、それにより生ずる正弦応力を  $\sigma(t) = \sigma_0 e^{i(\omega t + \delta)}$  で表すと、次式が成立する。

$$G^*(i\omega) = \frac{\sigma(t)}{\gamma(t)} = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} e^{i\delta} = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} (\cos\delta + i\sin\delta) \quad (3.49)$$

つまり、試料に振幅  $\gamma_0$  の正弦ひずみを与えたときの応力の振幅  $\sigma_0$  と位相差  $\delta$  を測定すれば、複素弾性率を求めることができる。この原理に従ったものが一般の動的測定法であり、この場合に求まるのは、与えた正弦ひずみの角周波数  $\omega$  に対応する複素弾性率である。

さて、線形粘弾性には、Boltzman の重畳原理式(3.50)が成立する

$$\sigma(t) = \int_{-\infty}^t \varphi(t-t') \frac{d\gamma(t')}{dt'} dt' \quad (3.50)$$

ここで、 $\varphi(s)$  ( $s = t - t'$ ) は余効関数である。

この式に、複素弾性率の定義で用いた正弦ひずみ  $\gamma(t') = \gamma_0 e^{i\omega t'}$  を代入し整理すると、次のようになる。

$$\sigma(t) = [i\omega \int_0^\infty \varphi(s) e^{-i\omega s} ds] \gamma(t) \quad (3.51)$$

そこで、

$$\Phi(i\omega) = \int_0^\infty \varphi(s) e^{-i\omega s} ds \quad (3.52)$$

とおき、式(3.49)に式(3.51)を代入すると、

$$G^*(i\omega) = \frac{\sigma(t)}{\gamma(t)} = i\omega \Phi(i\omega) \quad (3.53)$$

となり、複素弾性率は、余効関数のフーリエ変換  $\Phi(i\omega)$  と  $i\omega$  の積で表されていることがわかる。

さて、Boltzmann の重畳原理式(3.50)は、たたみ込み積分の形となっているから、フーリエ変換すると、次式となる。

$$\Sigma(i\omega) = \Phi(i\omega) \cdot i\omega \Gamma(i\omega)$$

ここで、 $\Sigma(i\omega)$ 、 $\Gamma(i\omega)$  はそれぞれ  $\sigma(t)$ 、 $\gamma(t)$  のフーリエ変換である。この式で、

$$\Gamma(i\omega) = 1 \quad (3.54)$$

とおくと、

$$\Sigma(i\omega) = i\omega \Phi(i\omega) = G^*(i\omega) \quad (3.55)$$

となり、応力  $\sigma(t)$  をフーリエ変換することによって、複素弾性率を求めることができる。

ところで、式(3.54)を与える関数はデルタ関数であるが、実験的にこのようなひずみ  $\gamma(t)$  を試料に与えることは不可能である。そこで、ここで次のような関数を考えて、これを Raised Cosine Pulse と呼ぶ。

$$\gamma(t) = \begin{cases} 1 + \cos \omega_0 t & (-\pi/\omega_0 \leq t \leq \pi/\omega_0) \\ 1 & (t < -\pi/\omega_0, t > \pi/\omega_0) \end{cases} \quad (3.56)$$

この関数の形は、図3.34となり、この Raised Cosine Pulse のフーリエ変換は式(3.57)となり、図3.34の下図となる。

$$\Gamma(\omega) = \frac{2\omega_0^2}{\omega(\omega_0^2 - \omega^2)} \sin\left(\frac{\omega}{\omega_0} \pi\right) \quad (3.57)$$

この関数は、 $\omega \ll \omega_0$  で  $\Gamma(\omega)$  がほぼ一定の実数値となっており、この条件では  $\Gamma(\omega) = 1$  とおけるから、Raised Cosine Pulse のひずみを与えられたときには、式(3.55)をそのまま適用できる。

角周波数  $\omega_0$  の Raised Cosine Puls を与えたとき、観測される応力をフーリエ変換することによって、 $\omega \ll \omega_0$  の周波数範囲における複素弾性率を求めることができる。ただし、解析精度から3オクタード位までが有効である。

### 3.5.3 実験の方法

#### (1) レオベキシアナライザー

R.C.P.法を適用して測定する装置としては、図3.35および図3.36に示す岩本製作所製レオベキシアナライザー A 1型を使用した。

この装置は、基本的には二重円筒型回転粘度計と

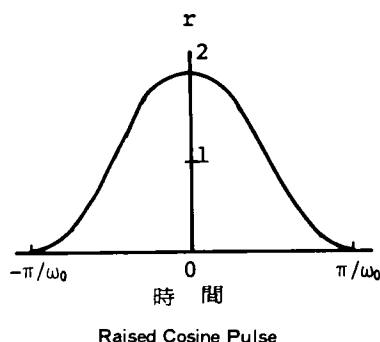


図3.34 Raised Cosine Pulse のフーリエ変換における角周波数の依存性

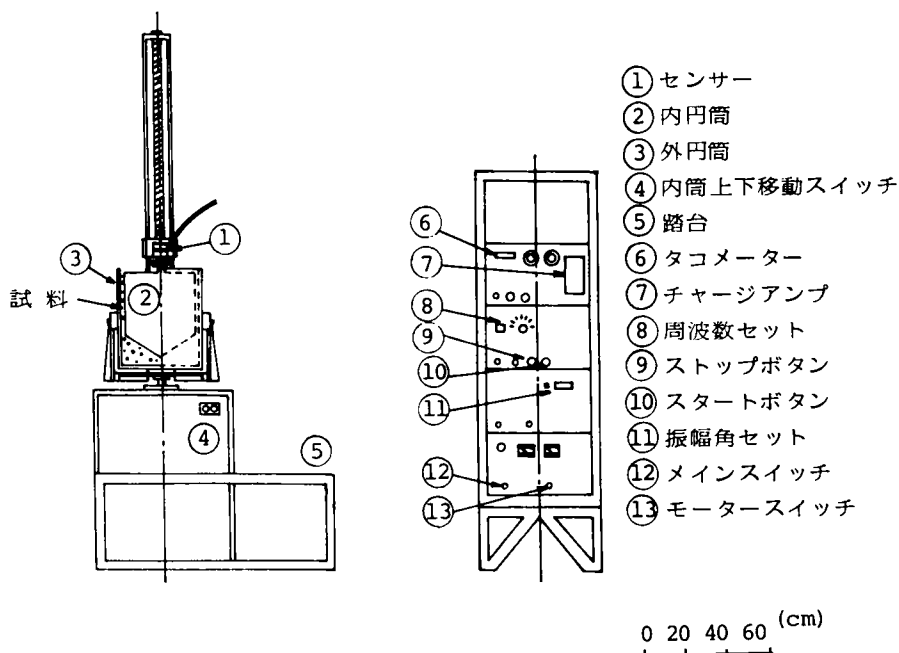


図3.35 レオベキシアナライザー A 1 型概略図

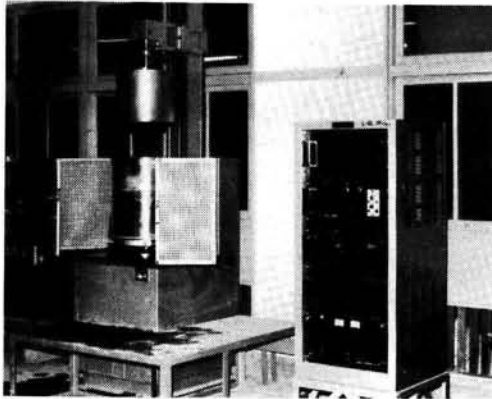


図3.36 レオベキシアナライザー A1型の全景

同じであるが、R.C.P.法は、図3.35に示すように二重円筒容器の円筒間に試料を入れ、外力として図3.34に示す R.C.P.と呼ばれる 1 パルスのねじ変形を外円筒に作用させ、その時の内円筒の応答トルクを測定し、これを前項で述べた方法によってフーリエ変換して粘弾性定数を求めるものである。

外円筒寸法は、内半径20cm、深さ47cmとし、内円筒は、先端を高さ10cmの円錐状にした外半径17.5cmおよび15cmで円筒部の長さ30cmの2種すなわち円筒間隔を2.5cmおよび5cmに変えられるものとした。

R.C.P.は、振幅を $0.33^\circ \sim 6.60^\circ$ まで $0.33^\circ$ 間隔で20段階、周波数を0.2, 0.1, 0.05, 0.01および0.005Hzの5段階に変えられるものとした。

## (2) 実験計画

測定方法について検討するため、表3.5に示すモルタルに関するAシリーズおよびコンクリートに関するBシリーズに分けて実験を行った。

表3.5 Raised Cosine Pulse 法検討のための実験計画

壁 面		平 滑 面、凹 凸 面				
周 波 数 (Hz)		0.2 , 0.1				
振 幅 ( $^\circ$ )		0.66 , 0.33				
配 合	A シリーズ (モルタル)	$v_a$ (W/C)	0.375 (0.53)	0.400 (0.48)		0.425 (0.43)
		$v_b$ (S/C)	0.500 (2.2)	0.450 (1.7)	0.500 (2.1)	0.550 (2.5)
	B シリーズ (コンクリート)	$v_a$ (W/C)	0.375 (0.53)	0.400 (0.48)		0.425 (0.43)
		$v_b$ (S/C)	(2.2)	0.500 (2.1)		(1.9)
		$v_c$ (s/a)	0.30 (54)	0.10 (82)	0.20 (67)	0.30 (54)

試料と粘度計壁面とのすべりが存在することも予想されるため平滑面およびゴム製の凹凸を貼り付た2種の壁面状態について検討し、周波数は、本装置で一番高い0.2Hzとその次の0.1Hzとし、振幅は、最小の $0.33^\circ$ およびその2倍の $0.66^\circ$ と変えた。

モルタルおよびコンクリートの配合は、表3.5に示すようにすべて体積割合で示し、モルタルに関するフロー値182~268のAシリーズ5種およびコンクリートに関するスランプ値14.4cm~20.6cm、粗骨材の最大寸法15mmの5種、計10種とした。

なお、測定は、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の試料温度、室温で同一配合、同一条件について日を変えて2回行った。

## (3) 使用材料および練り混ぜ

セメントは、Aシリーズでは比重3.16、ブレン値 $3120\text{cm}^2/\text{g}$ 、フロー値250、Bシリーズでは比重3.17、ブレン値 $3110\text{cm}^2/\text{g}$ 、フロー値253の普通ポルトランドセメントを使用した。

細骨材は、5mm以下の川砂を湿潤状態で使用し、粗骨材は、15~13mm、13~10mmおよび10~5mmにふるい分けた砂岩砕石を土木学会の標準粒度範囲のほぼ中央になるように質量比で2:2:6に再混合し、表乾状態で用いた。これらの物理試験結果を表3.6に示す。

表3.6 骨材の物理的性質

	細 骨 材	粗 骨 材
最大寸法 (mm)	—	15
比 重	2.64	2.60
吸 水 率 (%)	1.40	1.74
粗 粒 率 (F.M.)	2.90	6.29

モルタルおよびコンクリートの練りまぜは、容量50ℓの強制練りミキサーを用い、全材料投入後3分間で試料40ℓを練り混ぜた。試料温度は、 $15^\circ\text{C}$ 前後の室内に各材料を1日以上置き、さらに練り混ぜ水の温度を変えて、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ になるようにした。測定室の温度は $18 \sim 20^\circ\text{C}$ になるようにし、試料温度が測定中 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の範囲になるように努めた。

## (4) コンシステンシーの測定

モルタルは、JIS R5201に従ってフロー値、コンクリートは、JIS A1101に従ってスランプ値を測定した。測定は、同一試料について2回行った。

### (5) レオベキシーアナライザー A 1 型による測定

注水後13分以内に試料を図3.35に示すレオベキシーアナライザー A 1 型の二重円筒容器に空隙が残らないように木製の、2 cmの突き棒で突き固めながら、図3.37に示すように試料をセットした。

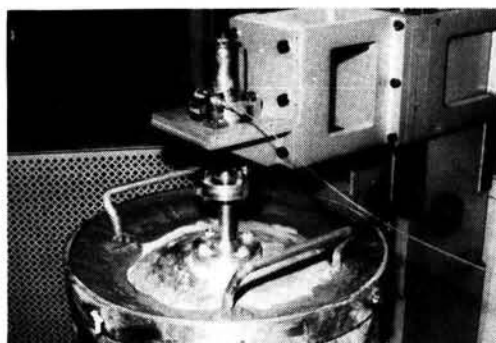
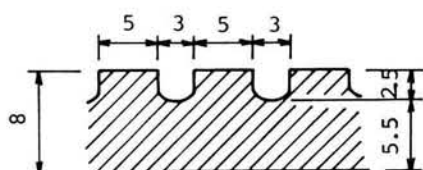


図3.37 レオベキシーアナライザー A 1 型に試料をセットした状態

モルタルを対象としたAシリーズでは、平滑面のとき外円筒内半径20cm、内円筒外半径17.5cm、円筒間間隔を2.5cm、内円筒先端部の円錐部分の効果をも考慮した有効浸液長(相当高さ)を31.7cm、凹凸面の場合、外円筒内半径19.2cm、内円筒外半径15.8cm、円筒間間隔3.4cm、ゴム製凹凸面を貼りつけた部分だけを有効と考えた有効浸液長(相当高さ)30cmとした。

コンクリートを対象としたBシリーズでは、平滑面のとき外円筒内半径20cm、内円筒外半径15cm、円筒間間隔5 cm、有効浸液長(相当高さ)32.0cmとし、凹凸面の場合は、それぞれ19.8cm、15.8cm、3.4cmおよび30cmとした。

なお、ゴム製の凹凸面は、図3.38に示す断面を持つ防振マットを円筒の垂直壁部分の内外に貼付して作成した。



(単位: mm)

図3.38 ゴム製凹凸板

R.C.P.は、1個の試料について、振幅角を一種とし、図3.39に示す応答トルクの収束の状態から判断して1~2分の間をあけて周波数0.1Hzおよび0.2 Hzに変えて測定した。R.C.P.および応答トルクは、図3.39に示すようにX-Tレコーダーで記録した。

測定は、注水後15分を測定開始の0分とし、10分あるいは一部5分間隔で1時間あるいは2時間まで行った。

粘弾性定数は、3.5.2で述べた磯田ら<sup>3-43)</sup>の測定理論を用いて解析した。X-Tレコーダーで記録した図上からR.C.P.は50個、応答トルクは残留応力を考慮して、R.C.P.と同一時間間隔で60個のデータを読み取り、作用させた周波数から3オクタード下位の周波数まで、次式で定義される複素弾性率を求めた。

$$G^*(i\omega) = G'(\omega) + iG''(\omega) \quad (3.58)$$

ここで、 $G^*(i\omega)$ は複素弾性率、 $G'(\omega)$ は貯蔵弾性率、 $G''(\omega)$ は損失弾性率、 $\omega$ は周波数である。



図3.39 Raised Cosine Pulse および応答トルク

### 3.5.4 実験結果およびその考察

#### (1) 試料容器壁面の粗度の影響

3.2で述べたように、回転粘度計においては粘度計壁面と試料の間には、境界層が発達しいわゆるすべりが発生することが知られている<sup>3-5,44)</sup>R.C.P.法も基本的には回転粘度計であり、その変形量が小さいだけであるので、このいわゆるすべりが発生する可能性が考えられる。そこで、3.5.3 (2)で述べたように同一試料について試料と接する容器壁面の粗度を平滑面と凹凸面とに変えて測定した結果の1例を図3.40に示す。

この図に見られるように、同一試料でR.C.P.周波数などが同じ同一条件での測定であっても、壁面の

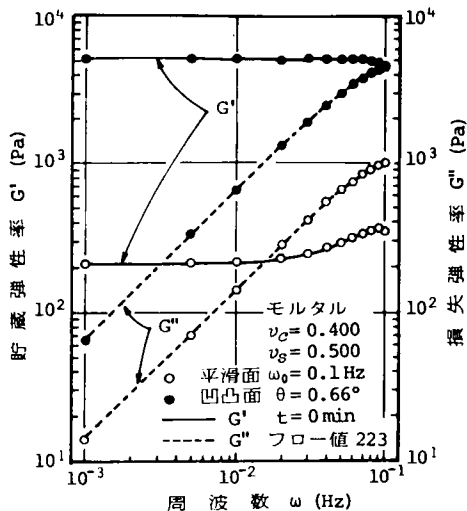


図3.40 壁面の粗度がモルタルの複素弾性率に与える影響

粗度の違いによって複素弾性率が異なることが示されている。貯蔵弾性率，損失弾性率ともに凹凸面の方が，他の条件が同じ場合には大きな値を与えており，その差は，貯蔵弾性率の方が大きくなっている。このような結果は，他の配合のモルタルやコンクリートにおいても同様である。これは，R.C.P.法のように回転粘度計に比べて格段に小さな変形を試料に与える場合でもいわゆるすべりが存在することが示唆されていると考えられる。

また，周波数の違いに対しては，図3.40に示されているように，本方法に含まれる高周波領域での非直線性による適用範囲外を除いた0.02Hz以下の低周波領域では，貯蔵弾性率は周波数の大きさに関係なく $10^{-4}$ Hzの範囲まではほぼ一定となり，損失弾性率は，周波数に対してほぼ一定の傾きで $10^{-4}$ Hzの範囲まで小さくなっている。壁面粗度の違いによる差は，それぞれほぼ平行となっているので，図3.40では $10^{-3}$ Hz以下を省略した。また経過時間の影響を比較するため周波数 $\omega = 0.001$ Hzのときの値を用いて考察することにする。

図3.41および図3.42に周波数 $\omega = 0.001$ Hzの貯蔵弾性率の経過時間による変化の1例を示す。

これらの図に見られるように，壁面の粗度の影響は，モルタルの配合や経過時間によって異なり，同一配合では，経過時間が長くなるすなわちモルタルのコンシステンシーが小さくなるほど粗度の違いに

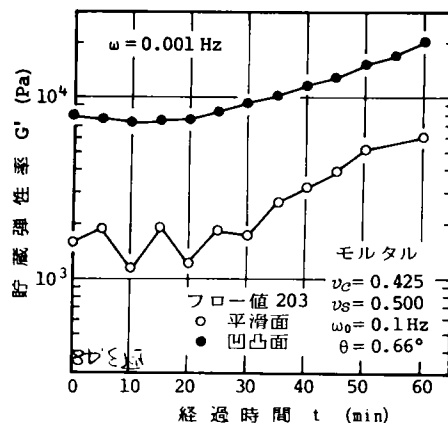


図3.41 壁面の粗度が異なる場合の経過時間と貯蔵弾性率との関係

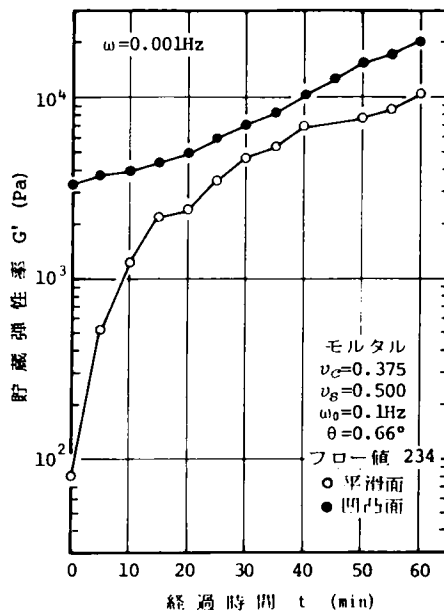


図3.42 壁面の粗度の異なる場合の経過時間と貯蔵弾性率との関係

よる差が小さくなる傾向があり，最初のコシテンシーが大きい配合ほどこの傾向は大となっている。

これは，自由ないいかえれば余分の水が多いほど壁面の粗度の影響が大きいということであり，自由水の多いほどすべり層が発達しやすくなりすべりやすいということであると考えられる。

損失弾性率においても図3.43および図3.44に1例を示すように，壁面の粗度の違いによって異なった値を示しており，配合の種類によっても影響されて

いる。この傾向は配合を広く変えると明瞭に表れ、図3.45<sup>3-45)</sup>に示すように、平滑面では、コンシステンシーの小さい硬いモルタルは、初期の境界層が発達し、すべっていることが示されている。

したがって、フレッシュモルタルやコンクリートの複素弾性率を本方法で求め相対的な比較を行うためには、容器壁面は平滑面でも適用可能な範囲があるが、いわゆるすべりが存在するので、配合の範囲を広くしたり、複素弾性率の絶対値を求めるためには、この壁面でのすべりについて検討する必要がある。

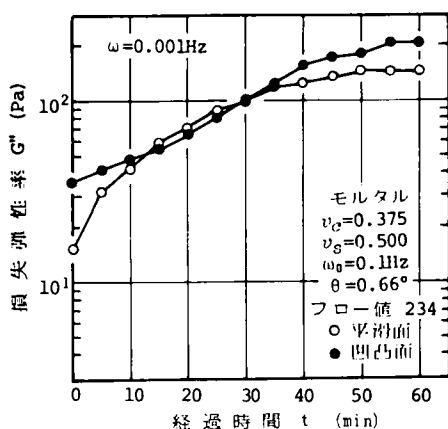


図3.43 壁面の粗度が異なる場合の経過時間と損失弾性率との関係

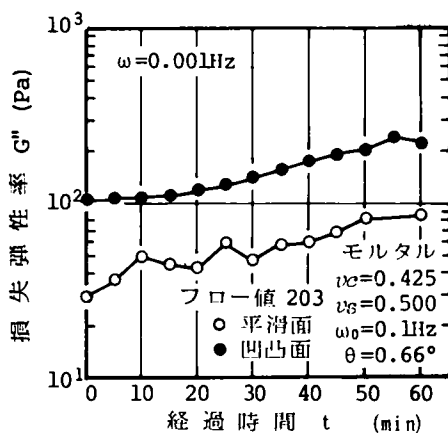


図3.44 壁面の粗度が異なる場合の経過時間と損失弾性率との関係

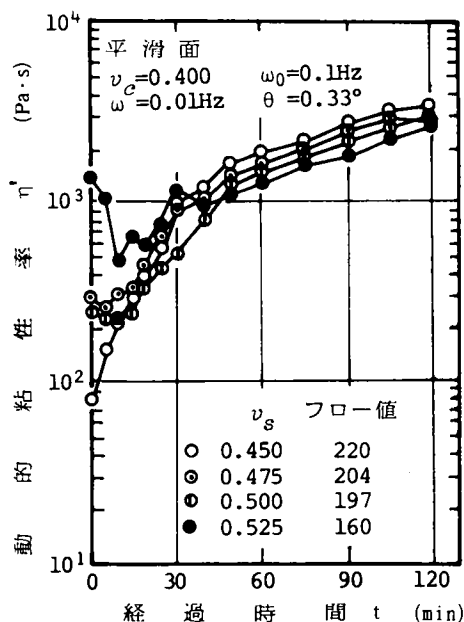


図3.45 経過時間とモルタルの動的粘性率との関係

## (2) R.C.P.周波数の影響

作用させるR.C.P.周波数が異なっても内部構造が破壊するなど構造の変化が生じないとすれば、本測定法における低周波数領域では、同一周波数に対して複素弾性率は同じ値となる。そこで、同一配合のモルタルに作用させるR.C.P.周波数 $\omega_0$ を0.1Hzと0.2Hzとに変えた場合の結果の1例は、図3.34に示した非線形になる適用範囲外を除くと、本項(1)の場合と同様にそれぞれの周波数に対して図3.46に示すように貯蔵弾性率はほぼ一定、損失弾性率は、ほぼ同じ傾きとなっている。しかし、R.C.P.周波数が異なると複素弾性率は相違しており、全周波数領域においてR.C.P.周波数の高い方が大きな値を与えている。

これは、変形速度を速くして測定した場合に複素弾性率が大きい値となっているということである。このような結果は、壁面を凹凸とした場合もコンクリートを試料とした場合も同様の結果となっている。しかし、壁面を凹凸面とした場合には、その差が小さいものが多い。

このR.C.P.周波数 $\omega_0$ が異なることによる、複素弾性率が相違することの原因についてははっきりしないが、本装置で試料に変形を生じさせようとする場合、試料のみでも約35 l あり質量で80kg以上に

り、かなり大きな慣性力が必要であるので、より速い変形を生じさせようとしても試料と容器との間にすべりが生じ、測定された複素弾性率が小さくなることが1つの理由と考えられる。

したがって、作用させる R.C.P. 周波数が異なれば、測定される複素弾性率は相違するので、相対的な比較をする場合は、その目的に適する R.C.P. 周波数で測定すればよいが、絶対値を問題とするときには、作用させる R.C.P. 周波数をいくりにするかは今後他の条件も含めて検討する必要がある。

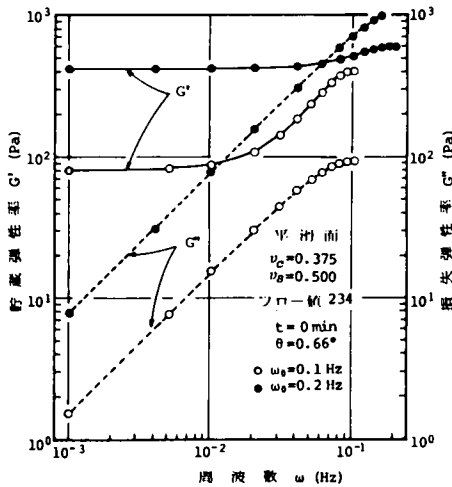


図3.46 複素弾性率に及ぼす R.C.P. 周波数の影響

### (3) R.C.P. 振幅角の影響

内部構造を破壊することなくフレッシュモルタルやコンクリートの物性を測定するためには、試料に作用させる変形は小さい方がよい。したがって、測定可能な範囲での小さな R.C.P. 振幅角で測定することが、物性変化を測定する場合には望ましい。

一方、内部構造そのものを問題とする場合には、R.C.P. 周波数が同じでも振幅角すなわち変形量の大小によって複素弾性率が異なることが、内部構造やそのメカニズムを検討するための資料とすることができると考えられる。

そこで、本研究で用いた装置で利用できる最も小さな振幅角 0.33° とその倍の 0.66° の 2 種について測定した結果の 1 例を図 3.47～図 3.49 に示す。

図 3.47 に見られるように、すべての周波数領域において R.C.P. 振幅角の違いの影響が示されており、

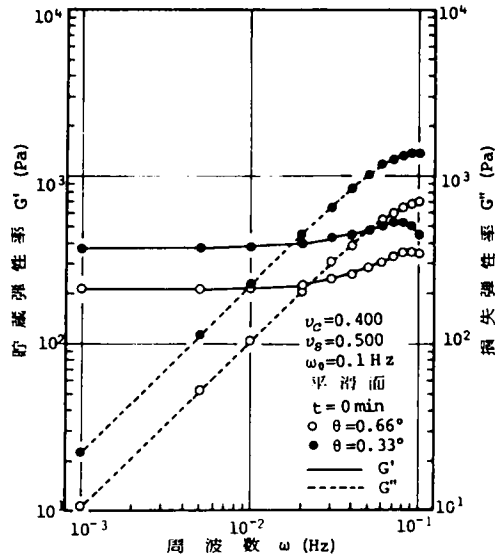


図3.47 R.C.P. 振幅角が複素弾性率に及ぼす影響

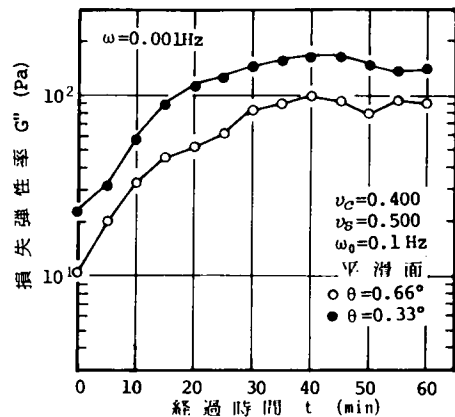


図3.48 R.C.P. 振幅角がモルタルの損失弾性率に及ぼす影響

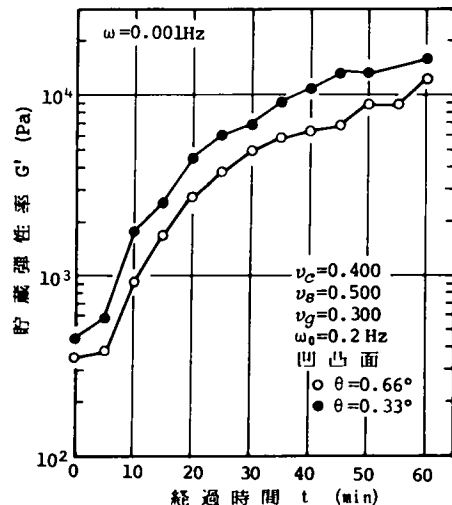


図3.49 R.C.P. 振幅角がコンクリートの貯蔵弾性率に及ぼす影響



振幅角の小さい方が複素弾性率は大きな値となっている。その差は、各周波数においてそれぞれほぼ一定となっている。平滑面を用いたモルタルに関する図3.48および凹凸面を用いたコンクリートに対する図3.49に1例を示したように、他の配合や条件においてもすべて同様の結果を示しており、変形量の小さい方が、大きな値を与えるといった結果となっている。

この原因については、変形の小さい方が、内部構造の破壊が小さいためあるいは慣性力によって左右される壁面でのすべりによるものと考えられる。

すべりの影響については、図3.49に示すように凹凸面であっても、振幅角の小さい方が、大きな貯蔵弾性率を与えており、凹凸面の先端部分で試料中にすべり面が形成されている可能性もあり、本実験の結果のみでは、いずれのあるいは両者の影響によるものかどうかは判明しない。

したがって、本装置でR.C.P.法を用いてフレッシュモルタルやコンクリートの複素弾性率を求めるためには、その振幅角によって測定される値が異なるため、内部構造の強さや構造を検討するために複素弾性率の絶対値が必要な場合にはこの振幅角をいくらにするか、また振幅角と複素弾性率の関係などを今後検討しなければならない。しかし、相対的な比較を行うためには、R.C.P.振幅角としては、 $0.33^\circ$ および $0.66^\circ$ いずれの値を用いてもよいと考えられる。

### 3.5.5 まとめ

試料に比較的小さな外乱を与えるだけで、広い範囲の周波数に対するフレッシュモルタルやコンクリートの複素弾性率が求められ、その内部構造について考察する資料が得られるR.C.P.法による測定方法について検討するため、試料容器壁面の粗度、R.C.P.周波数および振幅を変えて、これらの影響について調べた結果次のような問題点がわかった。

本装置のように回転粘度計に比べて格段に小さい変形を与えた場合でも、試料と容器との間にいわゆるすべりが存在することが考えられる。このすべりに対して、本実験で検討した凹凸面が有効であるかどうかは明確でないが、作用させるR.C.P.の周波数や振幅と凹凸の形状寸法などを関連づけて検討し、すべりの影響について明らかにする必要がある。

したがって、複素弾性率の絶対値を求めるために

は、壁面の粗度、R.C.P.周波数および振幅を変えることによっていずれの場合も複素弾性率は異なるので、これらの影響についても装置の性能とも関連づけて検討しなければならない。

しかし、フレッシュモルタルやコンクリートの経時変化を同一の試料ですでに形成された内部構造を大きく破壊することなく複素弾性率でもって相対的に比較検討することは、本実験で用いた測定方法のいずれにおいても可能である。

また、今後は従来のプロクターの貫入抵抗試験などの結果とも比較検討する必要があるだろう。

## 3.6 結 語

コンクリート施工の合理化のために必要なワーカビリティに代表されるフレッシュコンクリートの性質を定量的に表すためには、この性質を物理的な意味を持った数値で表せる方法で測定しなければならない。しかし、現在フレッシュモルタルやコンクリートの性質をこのような測定方法は、確立されていない。

本章では、モルタルやコンクリートの性質を測定するのに適すると考えられる回転粘度計、球ひきあげ粘度計、平行板プラストメータおよび試料に大きな外乱を与えることなく測定することができるRaised Cosine Pulse法について、基礎的な測定方法・精度、適用性および問題点について検討した。

以下、本章で得られた主な結果を要約すると以下のとおりである。

(1) フレッシュモルタルやコンクリートをビンガム物体と仮定して、回転粘度計でそのレオロジー定数を測定する場合、端末効果については、円筒底面間距離を4 cm程度以上にすることによって、この影響に対する補正はしなくてもよい。しかし、いわゆるすべりが発生することによる壁効果については、何らかの補正をしなければ正確なレオロジー定数は求まらない。

(2) フレッシュペーストやモルタルをビンガム物体と仮定することは、壁効果を補正したコンシステンシー曲線の結果から適当であると考えられる。

(3) (1)で述べたように回転粘度計中では、試料容器壁面付近でいわゆるすべり層が発生するが、実際の施工におけるポンプ工法の管内面、シュートの壁

面、型わくの内面等では、フレッシュコンクリートが壁面に接して流動しており、回転粘度計の壁面付近と同じような状態にあり、壁効果を補正しないみかけのレオロジー定数は、コンクリートの性質を施工方法と関連づける場合の基礎的なデータとして利用できる可能性がある。

(4) 落球型粘度計である球ひきあげ粘度計をビンガム物体に適用するためには、流動域と静止域とを解析的に区別することができず近似的な方法を用いることしかできないが、フレッシュペーストやモルタルのレオロジー定数をかなりの精度で求めることができる。しかし、この方法をコンクリートに適用するには、装置寸法、測定中の粗骨材の分離・架橋構造の生成などに問題点があり、多くの困難がある。

(5) 球ひきあげ粘度計においては、試料中を球が通過した後部に発生する空洞部分に水分が非常に多い物質がまず流れ込み、試料の均一性が保持できないことによる誤差が測定値に含まれる可能性も考えられる。

(6) 平行板プラストメータは、回転粘度計や球ひきあげ粘度計ではすべりが発生し、測定が困難であるような硬いペースト、モルタルおよびコンクリートをビンガム物体と仮定してそのレオロジー定数を求めることができる。

(7) モルタルやコンクリートのコンシステンシー曲線は、厳密にはビンガム物体の直線とはならず、変形速度の小さいところで応力軸に凸に漸近するので、平行板プラストメータのように変形速度が小さい範囲で測定する場合には、適切な大きさの変形速度を選択する必要がある。この変形速度は、試料に作用させる載荷重の大きさによって異なるので、試料のコンシステンシーに応じて荷重の大きさを変え最初の変形速度が $0.2\sim0.4\text{mm/s}$ 位にするのがよい。

(8) 平行板プラストメータの測定値の再現性は、変動係数で数%以内にほとんどのものがはいつている。

(9) 平行板プラストメータは、非較的硬いコンシステンシーの試料に適し、モルタルではフロー値200以下、コンクリートではスランプ値が12cm程度以下に適用できる。若干の誤差を許せば、さらに $2\sim3\text{cm}$ 大きい試料にも適用可能である。

(10) Raised Cosine Pulse 法のように他の方法に比べて非常に小さな変形しか与えない場合でも、試

料と容器壁面との間にいわゆるすべりの存在が考えられる。

(11) Raised Cosine Pulse 法でフレッシュモルタルやコンクリートの複素弾性率を求めるためには、試料に作用させる Raised Cosine Pulse の振幅角、周波数、すべりに対する対策または補正など解決しなければならない問題点が多く、今後の検討が必要である。

しかし、相対的な値を測定し、硬化過程の性状などを比較検討するためには、本実験で用いたいずれの測定方法でも適用できる。

なお、フレッシュコンクリートのレオロジー的性質は、コンクリートの施工条件から要求される品質を満足させるコンクリートを製造するために必要なものであり、この性質の測定は各施工段階での状況に対応していなければならない、本章で検討した測定方法がどのような施工条件と関連づけられるかは今後検討する必要がある。

## 参考文献

- 3-1) たとえば、吉田、；コンクリート及鉄筋コンクリートの施工方法、丸善、pp.186—194、岡田、六車編；改訂新版コンクリート工学ハンドブック、朝倉書店、pp.249—255.
- 3-2) 村田；まだ固まらないコンクリートのレオロジーの研究、コンクリートジャーナル、Vol.10, No.12, 1972, pp.1—10.
- 3-3) 村田；まだ固まらないコンクリートのレオロジー的性質の活用、セメントコンクリート、No.312, 1973, pp.16—23.
- 3-4) 村田；まだ固まらないコンクリートのレオロジーに関する基礎的研究、コンクリート工学、Vol.15, No.1, 1977, pp.25—34.
- 3-5) 村田、菊川；まだ固まらないコンクリートのレオロジー定数測定法に関する一提案、土木学会論文報告集、No.284, 1979, pp.117—126.
- 3-6) 角田、藤井、明石；フレッシュコンクリートの粘度式について、セメント技術年報、Vol.33, 1979, pp.227—230.
- 3-7) 西林、木山、阪田；フレッシュコンクリートのレオロジー的性質に関する基礎的研究—三軸試験による一考察—、土木学会第30回年次学術講演会講演概要集、5, 1975, pp.103—104.
- 3-8) 角田、明石；共振法によるフレッシュコンクリ

- トの物性測定に関する基礎的研究, 土木学会第27回  
年次学術講演会講演概要集, 5, 1972, pp.71—72.
- 3-9) 角田, 明石; パルス波によるフレッシュモルタル  
の物性測定に関する一実験, 土木学会第28回年次学  
術講演会講演概要集, 5, 1973, pp.144—145.
- 3-10) 角田; フレッシュコンクリートの複合機構がレ  
オロジー特性におよぼす影響について, 土木学会第  
31回年次学術講演会講演概要集, 5, 1976, pp.270—  
271.
- 3-11) 角田, 明石; フレッシュコンクリートの周波数特  
性について, 土木学会第32回年次学術講演会講演概  
要集, 5, 1977, pp.402—403.
- 3-12) 角田, 明石; フレッシュコンクリートの音速につ  
いて, 土木学会第33回年次学術講演会講演概要集,  
5, 1978, pp.133—134.
- 3-13) 角田, 明石; 骨材がフレッシュコンクリートの音  
速におよぼす影響, セメント技術年報, Vol.34,  
1980, pp.207—210.
- 3-14) 梅屋; セメントモルタルのレオロジー, 土木学会  
誌, Vol.64, No. 4, 1979, pp.27—34.
- 3-15) 梅屋, 大坪, 宮井; セメントペーストのレオロジ  
ー, 第27回レオロジー討論会講演要旨集, 1979, pp.  
39—42.
- 3-16) たとえば, 中川, 神戸; レオロジー, みすず書  
房, pp.495—584.
- 3-17) 西林, 木山, 阪田; フレッシュコンクリートのレ  
オロジー的性質に関する研究, 材料, Vol.24, 1975,  
pp.418—424.
- 3-18) ライナー, M.; 改訂レオロジーの基礎理論, コロ  
ナ社, pp.127—137.
- 3-19) 菊川; フレッシュコンクリートのレオロジーに  
関する基礎的研究, 土木学会第27回年次学術講演会  
講演概要集, 5, 1972, pp.5—8.
- 3-20) 村田, 菊川; 試作コンクリート用回転粘度計につ  
いて, 土木学会第26回年次学術講演会講演集, 5,  
1971, pp.233—236.
- 3-21) 既出 3-18) pp.312—317.
- 3-22) 菊川; 回転粘度計によるフレッシュコンクリ  
ートのレオロジー定数測定法, 土木学会第30回年次学  
術講演会講演概要集, 5, 1975, pp.96—97.
- 3-23) 長滝, 米倉; 回転粘度計によるモルタルの流動解  
析の1考察, セメント技術年報, Vol.29, 1975, pp.  
207—212.
- 3-24) Wesche, K., H. Flatten and W. vom Berg; On  
the Influence of Separations on the Rheological  
Investigations of Cement Paste and Mortar in the  
Rotation Rheometer, Proc. of RILEM Seminar of  
Fresh Concrete, 1973, Vol.1, pp.2.10—11.
- 3-25) 既出 3-16) pp.192—198.
- 3-26) 既出 3-16) pp.504—506.
- 3-27) Powers, T. C.; The Properties of Fresh Con-  
crete, John Wiley & Sons, Inc., pp.501—503.
- 2-28) 明石, 葛目; フレッシュコンクリートの振動時の  
粘性について, セメント技術年報, Vol.26, 1972, pp.  
272—274.
- 3-29) 既出 3-27) pp.440—441.
- 3-30) 岸谷, 岡; フレッシュペーストおよびモルタルの  
レオロジー定数測定, 日本建築学会論文報告集, No.  
305, 1981, pp.1—7.
- 3-31) 吉岡, 足立, 石村; 粘塑性流体の球を過ぎる遅い  
流れについて, 化学工学, Vol.35, 1971, pp.1144—  
1152.
- 3-32) Ansly, R. W.; Motion of Spherical Particles  
in a Bingham Plastic, AIChE Journal, Vol.13, 1967,  
pp.1193—1196.
- 3-33) ASTM D926—56.
- 3-34) 高分子学会レオロジー委員会; レオロジー測定  
法, 共立出版, p.111.
- 3-35) Scott, J. R.; Trans. Inst. Rubb. Ind., Vol. 7,  
1931, p. 7, Vol.10, 1934, p.481.
- 3-36) 既出 3-35) pp.113—117.
- 3-37) 岡, 小川; 平行板プラストメータの理論, 材料試  
験, Vol. 9, 1960, pp.321—324.
- 3-38) 岡; ビンガム物体に対する平行板プラストメ  
ータの理論, 材料, Vol.12, 1963, pp.314—316.
- 3-39) 川東, 王井; 高性能減水剤を添加したセメントペ  
ーストのレオロジー特性, 土木学会第35回年次学術  
講演会講演概要集, 5, 1980, pp.305—306.
- 3-40) Bergström, S. G.; Tests of properties of fresh  
concrete, Mag. of Conc. Research, No.11, 1952, pp.55  
—62.
- 3-41) 角田, 明石; 振動式回転粘度計によるフレッシュ  
コンクリートの物性測定に関する基礎的研究, 土木  
学会第34回年次学術講演会講演概要集, 5, 1979,  
pp.61—62.
- 3-42) 角田, 明石; 振動式回転粘度計によるフレッシュ  
コンクリートの物体測定に関する基礎的研究, 土木  
学会第35回年次学術講演会講演概要集, 5, 1980,  
pp.309—310.
- 3-43) 磯田, 大坪, 安江, 梅屋; Raised Cosine Pulse  
を用いた新しい粘弾性測定法, 日本レオロジー学会  
誌, Vol. 4, 1976, pp.133—136.
- 3-44) 牟田; 湿式吹付耐火被覆のポンプ圧送施工に關  
する研究, 第1報, 日本建築学会論文報告集, No.  
270, 1978, pp.1—6, 第2報, 同報告集, No.  
271, 1978, pp.7—14, 第3報, 同報告集, No.

272, 1978, pp. 1—10.

3-45) 水口；フレッシュモルタル・コンクリートの性質

の経時変化に関する一実験，第3回コンクリート工  
学年次講演会講演論文集，1981，pp.221—224.

## 第4章 フレッシュコンクリートのレオロジー 構成式に関する研究

### 4.1 概 説

第2章で述べたようにフレッシュコンクリートの施工条件から要求される適切なワーカビリティが、フレッシュコンクリート自身の性質の組合せで表せるとすると、そのような性質を持ったコンクリートの配合を求めることができないからである。このような品質を持つフレッシュコンクリートを効率よく選定するためには、使用材料の諸性質や配合などからコンクリート自身の性質を表すレオロジー定数を推定できることがまず必要である。

フレッシュコンクリートは、連続相と分散相とから成る高濃度のサスペンションと考えることができる。ニュートン流体を連続相すなわち分散媒とし、分散相として固体粒子を考えたまわめて稀薄な濃度のサスペンションの場合は、

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \eta_r = 1 + Kv \quad (4.1)$$

ここで、 $\eta$  はサスペンションの粘度、 $\eta_0$  は分散媒の粘度、 $\eta_r$  は相対粘度、 $K$  はサスペンション粒子の形状に関する係数、 $v$  はサスペンション粒子の体積濃度(分率)で表される。<sup>4-1)</sup>サスペンション粒子が球の場合  $K$  は2.5であることを Einstein<sup>4-2)</sup> が理論的に導いており、体積濃度  $v$  が0.02以下の場合に成立することが知られている。<sup>4-3)</sup>

ところが、セメントペーストの場合は、比較的大きな水セメント比0.70の場合でも粒子の体積濃度  $v_c$  は0.31に達し、さらにモルタルやコンクリートの一般的な配合での固体粒子の体積濃度は、0.6~0.8程度にもなり、式(4.1)は適用できない。

球形粒子のサスペンションの粒子間の相互作用を考慮し、濃度の高いところまで適用できる粘度式については、多くの試みがある。<sup>4-4,5)</sup> Guth と Simha<sup>4-4)</sup> や Vand<sup>4-5)</sup> による体積濃度  $v$  の高次式としたもの

や Brinkman<sup>4-6)</sup> Robinson, Asbeck らの式<sup>4-6)</sup>がある。

Brinkman<sup>4-7)</sup> は、Einstein の粘度理論式(4.1)から出発して、分散媒にサスペンション粒子を微量ずつ次々に添加して、その微量を添加する各過程に対しては、濃度の変化が少ないから式(4.1)が成立し、最後に所要の濃度の分散系になると考え、Brinkman の粘度式と呼ばれる次式を提案している。

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \eta_r = \frac{1}{(1 - v)^{2.5}} \quad (4.2)$$

ただし、各記号の意味は、式(4.1)の場合と同じである。この式は、広い粒度分布をもった粒子の場合0.4程度の高濃度までよく成立することが実験的に確かめられている。<sup>4-7)</sup> 一方、式(4.2)が適用できない0.4程度以上の更に濃厚なサスペンションの粘度の濃度依存性を正確に計算するのはきわめて困難であるといわれている。それは、等大球の粒子がサスペンション中に規則正しく配列していると仮定し、しかもはじめに仮定した粒子の配列の型によって理論が異なり、理論的には、立方格子配列で  $v = 0.52$ 、<sup>4-8)</sup> 最密充填格子配列では  $v = 0.74$ <sup>4-8)</sup> で粘度  $\eta$  の計算値が無限大となるためである。

また、高濃度サスペンションの粘度について、粒子が一時的に接触し、粒子の間隙に相当量の溶媒が包含された集合体が形成され、あたかも独立した粒子のように行動するとした理論がある。この集合体がかもし細長い形をしていると流れの速度勾配にもとづくせん断応力によって破壊されるから、平均として球に近い形をしていると考えられる。したがって、このような塊りを含んだサスペンションの粘度に対して、式(4.1)または式(4.2)の濃度  $v$  のかわりに、溶媒を包含して増加した有効濃度を考えるならば、これらの式はそのまま成立するはずである。このときの有効濃度は、次のように考えられている。サスペンションの濃度が増すにつれて粒子の占める空間

の割合は大きくなり、ついには全粒子が互に接触して最密充填状態に達し、全体は1つの粒子塊となる。この状態におけるサスペンション粒子の全体積に対する比  $v'$  の値が、それより低濃度においてつくられる粒子塊に対しても適用できると仮定すると、最密充填状態に対しては、 $v' = 0.74^{(4-8)}$  となる。すなわち、サスペンション粒子の有効体積濃度は、 $\frac{1}{v'}$  に増加しているわけである。このように考えて、式(4.1)および式(4.2)を書きなおすと、それぞれ次のようになる。

$$\eta_r = 1 + 2.5 \frac{v}{v'} \quad (4.3)$$

および

$$\eta_r = (1 - \frac{v}{v'})^{-2.5} \quad (4.4)$$

ただし、 $\frac{1}{v'} = 1.35$ (最密充填状態)

Mooney や Roscoe によると、 $4^{-70}$  0.10~0.50程度の濃度まで、式(4.3)および式(4.4)が大体成立するとしている。

この考え方をセメントペーストに適用したものとしては、菊川の研究<sup>4-9)</sup>があり、セメント粒子の濃度や粉末度をも考慮したペーストの相対粘度式として次式が提案されている。

$$\eta_r = (1 - \frac{v}{v'})^{-\alpha v^\beta \phi_m^\gamma} \quad (4.5)$$

ここで、 $\phi_m$ はセメント粒子の平均粒径、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ は定数、 $v$ はセメントの体積濃度、 $v'$ は集合したみかけのセメント粒子の最密充填濃度である。

また、これらを出発点として、Robinson は<sup>4-10)</sup>濃度が高くなると粒子間に包含される溶媒が多くなると考え、

$$\eta_r = 1 + \frac{K \frac{v}{v'}}{1 - \frac{v}{v'}} \quad (4.6)$$

ここで、 $K$ は粒子の形状係数で球ならば2.5である式を提案している。さらに高濃度においても成立するとした、

$$\log \eta_r = \frac{1}{2.303} \frac{Kv}{v' - v} \quad (4.7)$$

も提案している。

また、森、乙竹は<sup>4-11)</sup>サスペンションの全体積からサスペンション粒子を連続的かつ安定なせん断変形を与える限度の最高体積濃度に充填したときの粒子とそのまわりの容積を加えた体積を差引いた残りを自由空隙体積とし、これがせん断変形を受持つとして次式を提案している。

$$\eta_r = 1 + \frac{\bar{d}}{2} \frac{S}{\frac{1}{v} - \frac{1}{v''}} \quad (4.8)$$

ここで、 $\bar{d}$ は粒子の平均粒径、 $S$ は粒子の単位体積当りの比表面積、 $v$ は粒子の体積濃度、 $v''$ は連続的かつ安定なせん断変形を与える粒子の最高濃度である。

この考え方をペースト、モルタルおよびコンクリートに適用したものとして、角田らの研究<sup>4-12,13)</sup>があり、 $v''$ として骨材の濃度によって異なるが、0.52あるいは0.67を与え実験結果とよく一致していると報告している。

また、Hobbs は<sup>4-14)</sup>マトリックスに骨材がはいることによるマトリックスのせん断ひずみ速度の上昇を考慮した式を提案している。

このように、固体粒子を含むサスペンションの粘度式は数多く提案されているが、フレッシュペーストやコンクリートのように高濃度で、ほとんどの粒子が接触をしているような場合には、どの型式の式が適用できるか明らかでない。また、コンクリートについての検討は、角田ら<sup>4-13)</sup>や Hobbs<sup>4-14)</sup>の研究以外にはほとんどなされておらず、配合要因や使用材料の性質を変化させた研究も見当たらないようである。さらに、フレッシュコンクリートなどをビンガム物体と仮定した場合の降状値に関する構成式を検討したものは、ほとんどなく、これについて研究する必要がある。

そこで、本章では、フレッシュペースト、モルタルおよびコンクリートをビンガム物体と仮定し、連続相と分散相とから成る2相材料と考えて、その配合要因および構成材料の特性とレオロジー定数との関係を求め、フレッシュペースト、モルタルおよびコンクリートのレオロジー構成式について実験的に検討する。

## 4.2 フレッシュペーストのレオロジー構成式の検討

### 4.2.1 まえがき

フレッシュコンクリートのレオロジー構成式を検討するためには、4.1で述べたようにフレッシュコンクリートを連続相と分散相とから成る2相材料と考え、その複合効果によるものとして考察することが有効である。そのためには、まずフレッシュコンクリートを構成している各成分のレオロジー的性質について知る必要がある。

フレッシュコンクリートは、高濃度のサスペンションであり、2相材料であると考えられ、表4.1に示す混和剤を用いないプレーンコンクリートでは、2相材料のモデルとしては、表4.2に示す4つのケースが考えられる。

表4.1 プレーンコンクリートの構成

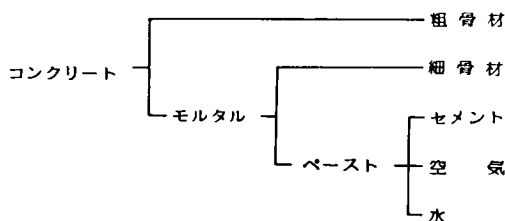


表4.2 フレッシュコンクリートの2相材料へのモデル化

ケース	連続相 (マトリックス)	分散相 (インクルージョン)
1	モルタル	粗骨材
2	ペースト	細骨材, 粗骨材
3	水と空気の混合物	セメント, 細骨材, 粗骨材
4	水	空気, セメント, 細骨材, 粗骨材

このように、フレッシュコンクリートを2相材料とするとしても各相として何を考えるかは、セメント、細骨材および粗骨材の粒子寸法が連続しているので、問題となる。本研究では、まずコンクリートは粗骨材とモルタル、モルタルは細骨材とペースト、ペーストはセメントと水とから成るそれぞれ2相材料として検討して行くことにする。

そこで、まずフレッシュペーストのレオロジー構成式について検討する。

フレッシュペーストのレオロジー構成式については、2.4で述べたようにすでにいくつかの研究が報告<sup>4-9,12,15-18)</sup>されている。これらを大別すると、

- (1) セメントと水とから成る2相材料と考えて、セメント粒子の体積濃度とレオロジー定数を結びつけたもの
- (2) 基本的には(1)と同じであるが、セメント粒子がペースト中では集合体となっており、分散媒をその集合体の中に取り込み、みかけ上粒子の体積濃度が大きくなっているとして塑性粘度と結びつけたもの

の2つがある。

混和剤を用いないプレーンペーストについて、Ish-Shalom ら<sup>4-15)</sup>は、回転型粘度計を用いてセメントの組成、表面積変化に伴う影響、イオンの影響などに関して系統的研究を行っており、回転型粘度計を用いた Papadakis,<sup>4-16)</sup>角田ら<sup>4-12)</sup>落球型粘度計を用いた岸谷ら<sup>4-17)</sup>は、セメント粒子の体積濃度とレオロジー定数との関係式を与えている。

村田ら<sup>4-9,18)</sup>は集合体粒子の概念を用いて、回転粘度計による測定結果からセメントペーストの濃度やセメントの粉末度によって集合体粒子の形状が異なるとした式(4.5)などを提案している。

しかし、これらの提案式は、図4.5に示すように測定方法が異なることもあって結果は大きく異なっている。

本節では、ビンガム物体と仮定したペーストが水と空気の混合物の連続相とセメント粒子を分散相とする2相材料と考え、セメントの体積濃度とレオロジー定数との関係について実験的に求め、そのレオロジー構成式を検討する。なお、フレッシュペーストのレオロジー定数は、測定方法による違いを調査するため、球ひきあげ粘度計、回転粘度計および平行板プラストメータを用いて比較検討する。

### 4.2.2 実験計画および実験の方法

#### (1) 実験計画

フレッシュペーストをビンガム物体と仮定し、セメント体積濃度とレオロジー定数との関係を実験的に検討するため以下の実験を計画した。

実験は、A、BおよびCの3つのシリーズに分けて行った。シリーズAは、球ひきあげ粘度計を用いたもの、シリーズBは、回転粘度計を用いたものお

表4.3 測定したペーストの配合

セメント体積濃度 $v_c$	水セメント比 (W/C)	実 験 シ リ ーズ		
		A (球ひきあげ)	B (回 転)	C (平 行 板)
0.241	1.000	○		
0.261	0.900	○		
0.284	0.800	○		
0.312	0.700	○		
0.325	0.659		○	
0.328	0.650	○		
0.346	0.600	○		
0.350	0.590		○	
0.366	0.550	○		
0.375	0.529		○	
0.388	0.500	○		
0.400	0.476		○	
0.414	0.450	○		
0.425	0.430		○	
0.442	0.400	○		
0.450	0.388		○	
0.458	0.375	○		
0.475	0.350	○	○	
0.494	0.325	○		
0.500	0.317		○	
0.514	0.300	○		
0.525	0.287		○	○
0.550	0.260			○
0.575	0.235			○

注) ○印は測定した配合を示す。

よびシリーズCは、平行板プラストメータを用いたものとした。また、回転粘度計においては、壁効果を補正したもの(シリーズB<sub>2</sub>)と補正しないもの(シリーズB<sub>1</sub>)とを行った。

配合要因は、セメントペースト中のセメント粒子の体積濃度  $v_c (= \frac{C}{w+C})$  で表し、空気量については無視した。測定した配合は、レオロジー定数測定装置によって異なるが、 $v_c = 0.241$  (W/C = 1.000) ~ 0.575 (0.235) の範囲に変えた。それらの組合せは、表4.3に示す。

なお、試料の温度は20±2℃とし、測定は日を変えて2回行いその平均を測定値とした。

#### (2) 使用材料

セメントは、表4.4に示す4種の普通ポルトランドセメントをそれぞれのシリーズに1種ずつ使用した。

#### (3) 練り混ぜおよびフロー値の測定

シリーズAでは、容量10ℓのモルタルミキサを用

表4.4 使用セメントの性質

実験シリーズ	比 重	比 表 面 積 (ブレン法) (cm <sup>2</sup> /g)	フロー値
A	3.15	3210	246
B <sub>1</sub>	3.16	3100	244
B <sub>2</sub>	3.16	3080	244
C	3.16	3100	244

い、試料4ℓを練り混ぜた。練り混ぜ方法は、ASTM C305に従った。水とセメントを練りはちに入れ30秒間吸水させ、その後142rpmで120秒間練り混ぜ、15秒間静止させ、この間にはちについたセメントをヘラで落としたのち282rpmで1分間練り混ぜた。

シリーズBおよびCでは、容量50ℓの強制練りミキサを用い、シリーズBでは15ℓ、シリーズCでは12ℓの試料を練り混ぜた。練り混ぜは、ミキサのパ



ンにセメントを入れ、練り混ぜながら約10秒間で水を加え、その後3分間練り混ぜた。

練り混ぜたペーストは、すぐに JIS R5201 に規定されている方法に従ってフロー値を測定した。

なお、試料の練り上がり温度は、セメントの温度を20℃近くなるようにし、練り混ぜ水の温度を変えて、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ になるようにした。

#### (4) レオロジー定数の測定

レオロジー定数には、本項(1)の実験計画で述べたように3種の装置を用い、第3章で述べた方法とほぼ同様にして測定した。

第3章3.3.2で述べた球ひきあげ粘度計による測定では、球の半径を1.42cmとし、試料を入れる円筒容器を直径12cm、深さ25cmとした。球のひきあげ速度は、0.10、0.25、0.40、0.55、0.70および0.85cm/sに変え、球に働く抵抗力は容量4.90Nのロードセルを用いて測定した。その他の手順は、第3章3.4で述べた方法と同一にした。

第3章3.2.3で述べた二重円筒回転粘度計による測定では、第3章3.3で行った同じ方法で測定した。壁効果を考慮したものとししないものの両者について行った。

第3章3.4.3で述べた平行板プラストメータIII型を用いた測定では、円板直径を30cm、試料高さを約3cmとし、載荷荷重の大きさを試料のコンシステンシーに応じて変え、最初の変形速度が0.2~0.4mm/sになるものとし、第3章3.5で述べた方法に従って行った。

なお、レオロジー定数は、それぞれ第3章で述べた方法を用いて求めた。

### 4.2.3 実験結果およびその考察

#### (1) はじめに

試料温度は、すべて $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の範囲にあり、測定手順も同一としたので、これらの違いによるレオロジー定数の差は小さいとして無視して考察する。

#### (2) 球ひきあげ粘度計によるもの

球ひきあげ粘度計によって求めたセメントの体積濃度  $v_c$  とレオロジー定数すなわち降伏値  $\tau_y$  および塑性粘度  $\eta_{pl}$  あるいは相対粘度  $\eta_r$  との関係を図4.1~図4.3に示す。

この場合、セメントペーストを水とセメント粒子とから成る2相材料と考えているので、水の20℃に

おける粘性係数は、ほとんど $0.001\text{Pa}\cdot\text{s}$ としてよいので  $\eta_r = \eta_{pl} \times 10^3$ となるので同一の図に示す。

これらの図に示されているように、セメント体積

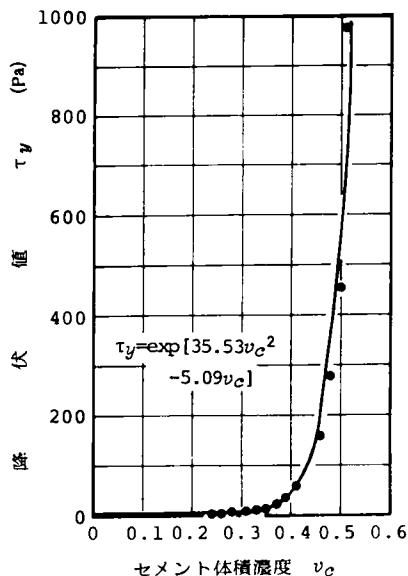


図4.1 セメントの体積濃度と降伏値との関係

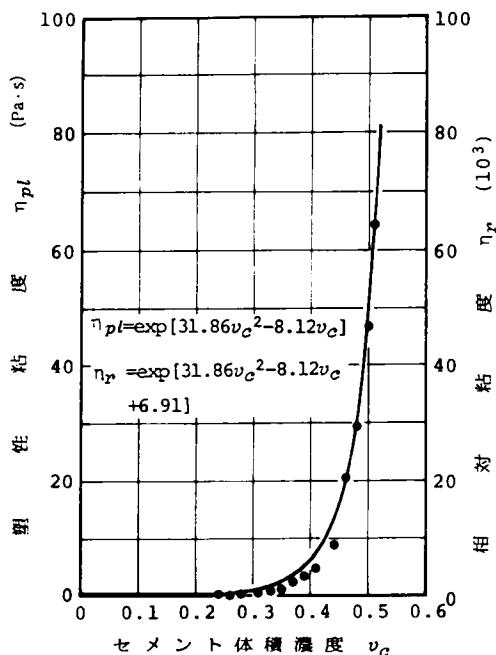


図4.2 セメントの体積濃度と塑性粘度との関係

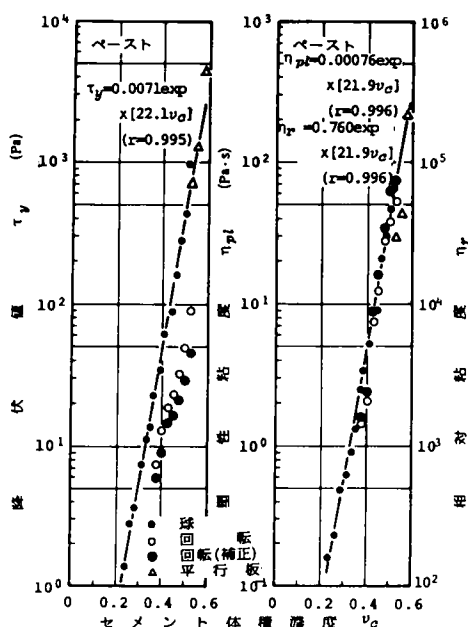


図4.3 セメント体積濃度とレオロジー定数との関係

濃度が0.3程度以下では、降伏値および塑性粘度ともにほとんど増加してないが、0.4程度を超えると急に増大している。これは、セメント粒子のフロック、接触、連続相のセメント粒子への吸着、流れの乱れなど多くの要因によるものと考えられる。

このような、フレッシュペーストのレオロジー構成式を検討する場合、本章4.1で述べたような理論式あるいは内部構造モデルを考え、これを適用する方法も考えられるが、森・乙竹式を適用した角田らの結果<sup>4-12)</sup>では、セメント体積濃度  $v_c = 0.323$  まですなわち W/C で約0.70以上という限界があり、集合粒子の概念を用いた村田らの式<sup>4-18)</sup>では、係数を最終的に実験で求めており現在では、完全な理論式としては成功していない。これは、現在用いられているセメントペーストの濃度が非常に高く、従来の理論式をそのまま用いるには、多くの問題点を含んでいるためと考えられる。

そこで、本研究では、フレッシュペーストのレオロジー構成式は実験式として求めることとし、2相材料の最も基本となる各相の量のみ、すなわちセメント体積濃度のみをパラメータとして検討する。セメント体積濃度とレオロジー定数の対数との関係を図4.3に示す。

これらの図に示されているように、片対数グラフ上では、セメント体積濃度とレオロジー定数との関係はそれぞれ線形関係と考えられるので、その関係式を求めると次式となる。

$$\tau_y = 0.0071 \exp[22.1 v_c] \quad (\text{Pa}) \quad (4.9) \quad (r = 0.995)$$

$$\eta_{pl} = 0.00076 \exp[21.9 v_c] \quad (\text{Pa} \cdot \text{s}) \quad (4.10) \quad (r = 0.996)$$

$$\eta_r = 0.760 \exp[21.9 v_c] \quad (r = 0.996) \quad (4.11)$$

ここで、 $\tau_y$  は降伏値、 $\eta_{pl}$  は塑性粘度、 $\eta_r$  は相対粘度、 $v_c$  はセメント体積濃度 ( $= \frac{c}{w+c}$ )、 $r$  は相関係数であり、高い相関係数での実験式が得られている。

これらの実験式において、セメント体積濃度  $v_c = 0$  (水) では降伏値  $\tau_y$  は0.0071Pa となり、Ish-Shalom ら<sup>4-15)</sup>の0.18Pa、よりは小さく、Papadakis<sup>4-16)</sup>の0.004Pa よりは大きくなっている。同じく塑性粘度  $\eta_{pl}$  は、Papadakis<sup>4-16)</sup>の0.001Pa·s、Ish-Shalom らの0.0009Pa·s に比べて0.00076Pa·s とやや小さな値となっているが、理論値の0.001Pa·s とは大きくはずれていないといえよう。

また、今まで報告されているフレッシュペースト

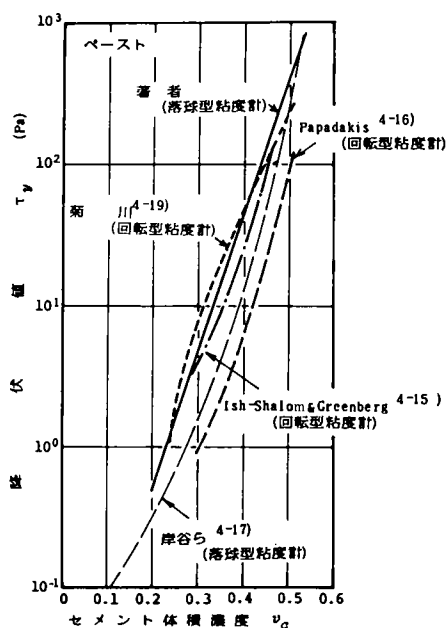


図4.4 セメントペーストの降伏値の構成式の比較

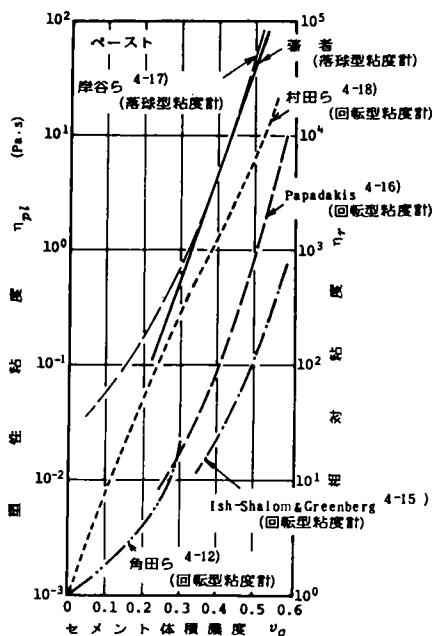


図4.5 セメントペーストの塑性粘度の構成式の比較

の各種構成式を図4.4および図4.5に比較して示す。降伏値においては、図4.4に示されているように同じセメント体積濃度に対して最大1オーダ程度の差はあるが、セメントの体積濃度の増加に対する降伏値の変化の傾きはほぼ同じとなっている。著者の結果は、他の研究者のものより大きな値を与えている。

塑性粘度においては、同一セメント体積濃度に対して2～3オーダの差があり、研究者によって大きく異なっている。しかし、この場合もそれぞれの関係式の勾配は大差ない。

これらレオロジー定数の違いは、材料すなわちセメント、練り混ぜ方法、測定方法などによって生じていると考えられる。しかし、どの要因がどの程度影響しているかが明らかでなく、ペーストのレオロジー構成式を確立するためには、本項(2)、(3)で後述するように測定方法も含めて更に検討する必要がある。

### (3) 回転粘度計によるもの

実験シリーズBの二重円筒型回転粘度計を用いて求めた結果を図4.3に示す。

この図に示されているように降伏値は、壁効果を補正したものもしないものも球ひきあげ粘度計で求

めたものとはかなり異なっている。塑性粘度は、球ひきあげ粘度計の結果よりも小さいものもあるが、ほとんどのものはほぼ同じ値となっている。

このように、回転粘度計で求めた降伏値が球ひきあげ粘度計で求めたものより小さくなっているのは、図4.4に示した回転粘度計による Papadakis<sup>4-16)</sup>や Ish-Shalom ら<sup>4-15)</sup>の結果の場合と同様である。回転粘度計においては測定時に試料に与える変形量が多く材料分離を生じて水分の多い層が発生し、みかけ上降伏値が小さく測定されていることやチクソトロピーによるものと考えられる。

一方、塑性粘度は、村田ら<sup>4-20)</sup>によると回転粘度計ではすべり層ができこの影響を考慮せずにレオロジー定数を求めると真の値よりも小さく測定することになると報告しているが、本実験の結果では前述したようにほぼ同じ値となっているものの、第3章3.3および3.4で述べたように測定方法そのものの検討が必要である。

### (4) 平行板プラストメータによるもの

平行板プラストメータによって求めた結果は、図4.3に示すように、測定点数が3点と少ないものの降伏値は、球ひきあげ粘度計の結果の延長線上にある。しかし、塑性粘度については、測定点数が少なくはつきりしたことはいえない。

平行板プラストメータは、第3章3.5で述べたように比較的硬い試料のレオロジー定数の測定に適するので、球ひきあげ粘度計やその他の測定装置では、測定できない試料に適用し、広い範囲の配合のレオロジー定数測定に利用できる可能性がある。

### 4.2.4 まとめ

以上述べてきたように、フレッシュセメントペーストのレオロジー定数は、測定方法によって異なり、どの測定装置によるものが適切であるかは不明であるので、本実験では、広い範囲の配合の測定に適する球ひきあげ粘度計を用いた結果から実験的にレオロジー構成式を求めた。

ペーストのレオロジー定数の対数とペースト中のセメント粒子の体積濃度との間には、実験的に線形関係となり、高い相関で式が得られた。

$$\tau_y = 0.0071 \exp[22.1 v_c] \quad (\text{Pa}) \quad (4.9)$$

$$(r = 0.995)$$

$$\eta_{pl} = 0.0076 \exp[21.9 v_c] \quad (\text{Pa} \cdot \text{s}) \quad (4.10)$$

$$(r = 0.996)$$

$$\eta_r = 0.760 \exp[21.9 v_c] \quad (r = 0.996) \quad (4.11)$$

ここで、 $\tau_y$  は降伏値(Pa)、 $\eta_{pl}$ は塑性粘度(Pa・s)、 $\eta_r$ は相対粘度、 $v_c$ はセメントペースト中のセメントの体積濃度( $= \frac{c}{w+c}$ )、 $r$ は相関係数である。

なお、式(4.9)～(4.11)は、他の研究者の結果と比較すると大きい方の値を与えている。

また、フレッシュペーストのレオロジー構成式は、測定方法や研究者によってその結果が大きく異なっており、今後さらに測定方法を含めて検討する必要がある。

### 4.3 フレッシュモルタルのレオロジー構成式の検討

#### 4.3.1 まえがき

フレッシュモルタルは、表4.1に示したように、水、空気、セメントおよび細骨材とから成り、2相材料としては、表4.2に示すもののうちケース2～4で粗骨材を除いた3つのモデルが考えられる。

Powers<sup>(4-21)</sup>、角田ら<sup>(4-13)</sup>、菊川<sup>(4-22)</sup>は、フレッシュモルタルをペーストと細骨材とから成る2相材料と考えてレオロジーの検討を加えている。Powers<sup>(4-21)</sup>は、モルタルのスティフネスに及ぼす細骨材の体積濃度および寸法の影響について調べ、角田ら<sup>(4-13)</sup>は、森・乙竹式<sup>(4-11)</sup>をモルタルに適用し、回転型粘度計による結果から相対粘度を求める次式を提案し、降伏値と細骨材の体積濃度との関係を求めている。

$$\eta_r = 1 + \frac{\bar{d}}{2} \frac{S}{\left(\frac{1}{v_s} - \frac{1}{0.52}\right)} \quad (4.12)$$

ここで、 $\eta_r$ は相対粘度、 $\bar{d}$ は細骨材の平均粒子径、 $S$ は単位体積中の細骨材の比表面積、 $v_s$ は細骨材の体積濃度である。菊川<sup>(4-22)</sup>は、Brinkmanの式<sup>(4-5)</sup>を適用し、細骨材の実積率、体積濃度および形状係数を用いて定式化を試みている。

角田ら<sup>(4-13)</sup>、菊川<sup>(4-22)</sup>の結果は、細骨材の粘度や粒形を広く変化させた結果でなく、式(4.12)は細骨材の体積濃度 $v_s$ が0.52までに限られるが実際のモルタルでは0.60以上になることもあり、降伏値につい

ては構成式を求めることに成功していない。フレッシュモルタルのレオロジー構成式を求めるためには、細骨材の体積濃度、粒度、粒形などを変え、これらがモルタルのレオロジー定数に及ぼす影響を表す指標について検討する必要があるが、この面についての研究結果は少ない。

そこで、本節では、フレッシュモルタルをペーストの連続相と細骨材の分散相とから成る2相材料と考える。そして、ペーストの性質、細骨材の体積濃度、粒子、粒形を変えこれらがビンガム物体と近似したフレッシュモルタルのレオロジー定数に及ぼす影響を定量的に表すパラメータについて実験的に検討し、フレッシュモルタルのレオロジー構成式を求めることとする。その他、レオロジー定数相互の関係や、レオロジー定数の指標になると考えられるフロー値や $\frac{1}{2}$ 縮尺のスランプコーンを用いたスランプ値およびVB値との関係について検討する。

#### 4.3.2 実験計画および実験の方法

##### (1) 実験計画

フレッシュモルタルのレオロジー構成式を検討するためには、モルタルのレオロジー的性質を左右する各種要因の影響について定量化することが必要である。

フレッシュモルタルの性質に影響する要因としては、構成材料の性質、配合、練り混ぜ方法、温度などの環境条件、練り混ぜ後の経過時間など多くのものがある。本研究では、これらのうち主なものと考えられる細骨材の性質すなわち粒度および配合要因すなわちセメントペーストの性質、細骨材量を変えてこれらの影響を調べ、レオロジー定数に及ぼすこれら要因の影響を定量的に表すパラメータについて実験的に検討し、フレッシュモルタルのレオロジー構成式を求めることとする。

このため実験は、次の4つのシリーズに分けて行った。

シリーズⅠ；細骨材の種類を1種として、ペーストの品質および細骨材量を変化させたもの(表4.5参照)

シリーズⅡ；ペーストの品質を一定として、細骨材の粒度および細骨材量を変化させたもの(表4.6参照)

シリーズⅢ、Ⅳ；ペーストの品質、細骨材の粒度

表4.5 モルタルに関するシリーズⅠの実験計画

$v_c$ 細骨材の種類 $v_s$	$D_4$											
	0.300	0.325	0.350	0.375	0.400	0.425	0.450	0.475	0.500	0.525	0.550	0.575
W/C	0.74	0.66	0.59	0.53	0.48	0.43	0.39	0.35	0.32	0.29	0.26	0.23
$v_s$												
0.05									○	○	○	
0.10									○	○	○	○
0.15									○	○	○	
0.20									○	○	○	
0.25							○	○	○	○	○	
0.30							○	○	○	○	○	
0.35							○	○	○	○	○	
0.40							○	○	○	○	○	
0.45						○	○	○	○	○	○	
0.50					○	○	○	○	○	○	○	
0.55			○	○	○	○	○	○	○	○	○	
0.60	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

注) ○印は測定した配合を示す。

表4.6 モルタルに関するシリーズⅡの実験計画

$v_c$ 細骨材の種類 $v_s$ (C/S)	$D_4$				
	0.400	0.48	0.500	0.525	0.550
W/C	0.400	0.48	0.500	0.525	0.550
$v_s$ (C/S)					
0.375 (1/1.8)	○	○			
0.400 (1/2.0)	○	○			
0.408 (1/2.1)	○				
0.416 (1/2.1)	○				
0.425 (1/2.2)	○	○			
0.440 (1/2.4)		○			
0.450 (1/2.5)	○	○			
0.460 (1/2.6)		○			
0.475 (1/2.7)		○	○		○
0.500 (1/3.0)			○	○	○
0.515 (1/3.2)			○		
0.525 (1/3.3)			○	○	○
0.530 (1/3.4)			○		
0.540 (1/3.5)			○	○	○
0.550 (1/3.7)			○	○	○
0.560 (1/3.8)			○		
0.575 (1/4.1)			○	○	○

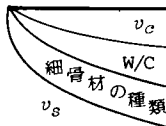
注) ○印は測定した配合を示す。

表4.7 モルタルに関するシリーズⅢの実験計画

$v_c$ 細骨材の種類 $v_s$	0.375				0.400				0.425				0.450			
	W/C				0.53				0.48				0.43			
$v_s$	B	C <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>	F <sub>2</sub>	B	C <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>	F <sub>2</sub>	B	C <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>	F <sub>2</sub>	B	C <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>	F <sub>2</sub>
0.425													○	○	○	○
0.450									○	○	○	○	○	○	○	○
0.475									○	○	○	○	○	○	○	○
0.500	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
0.525	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
0.550	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

注) ○印は測定した配合を示す。

表4.8 モルタルに関するシリーズⅣの実験計画

	0.350			0.375			0.400			0.425			0.450		
	W/C			0.53			0.48			0.43			0.39		
細骨材の種類	C <sub>1</sub>	D <sub>3</sub>	F <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>3</sub>	F <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>3</sub>	F <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>3</sub>	F <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>3</sub>	F <sub>1</sub>
0.40				○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○
0.45	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
0.50	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
0.55	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
0.60	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

注) ○印は測定した配合を示す。

## (2) 使用材料

セメントは、表4.9に示す普通ポルトランドセメントをそれぞれの実験シリーズに用いた。

表4.9 使用セメントの性質

実験シリーズ	比 重	比 表 面 積 (ブレン法) (cm <sup>2</sup> /g)	フロー値
I	3.16	3100	244
II	3.16	3120	250
III	3.16	3080	244
IV	3.15	3120	245

細骨材は、表4.10に示す12種のものを使用した。その粒度曲線は、図4.6に示す。

細骨材の粒度は、図4.6に見られるように大別すると粒度A、B、C、D、EおよびFの6種であり、

粒度AおよびEは単一粒度とし、粒度Bは土木学会の標準粒度範囲に入らない細かいものとした。粒度C、DおよびFは、標準粒度範囲内かわずかにはずれたものであり、粒度Dは標準粒度範囲のほぼ中央、粒度CおよびFは、それぞれ標準範囲の細かめおよび粗めの標準粒度に近いものとした。

細骨材は、表面乾燥飽水状態に近い空气中乾燥状態で1m<sup>2</sup>のビンに貯蔵し、使用直前に含水率を測定し、有効吸水量を補正して使用した。

## (3) モルタルの配合

モルタルの配合は、本項(1)で述べたようにモルタルをペーストと細骨材とから成る2相材料としたので、ペーストの品質を変えるために、セメントペースト中のセメントの体積濃度  $v_c (= \frac{c}{w+c})$  すなわち水セメント比 W/C を用い、細骨材量は、モルタル中の細骨材の体積濃度  $v_s (= \frac{s}{w+c+s})$  を使

表4.10 使用細骨材の各種性質

細骨材の種類	実験シリーズ	粗粒率 (F.M.)	比 重	吸水率 (%)	実積率 (%)	比表面積 (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	備 考
A	II	0.94	2.62	0.57	57.9	29 981	豊浦標準砂
B	II, III	1.67	2.62	1.57	59.7	20 941	海 砂
C <sub>1</sub>	IV	2.10	2.62	1.75	60.2	17 135	川砂E+海砂
C <sub>2</sub>	III	2.15	2.62	1.48	61.2	17 271	川砂D+海砂
D <sub>1</sub>	II	2.57	2.62	1.44	66.0	14 689	川 砂 B
D <sub>2</sub>	III	2.63	2.63	1.32	64.7	13 331	川 砂 D
D <sub>3</sub>	IV	2.66	2.62	1.75	64.8	13 637	川砂E+海砂
D <sub>4</sub>	I	2.74	2.62	1.50	63.7	11 145	川 砂 A
D <sub>5</sub>	II	2.76	2.60	2.26	65.7	12 301	川 砂 C
E	II	3.00	2.62	0.50	62.1	7 140	相馬標準砂
F <sub>1</sub>	IV	3.22	2.62	1.76	66.3	10 247	川 砂 E
F <sub>2</sub>	III	3.31	2.62	1.75	67.0	9 130	川砂Dを調整

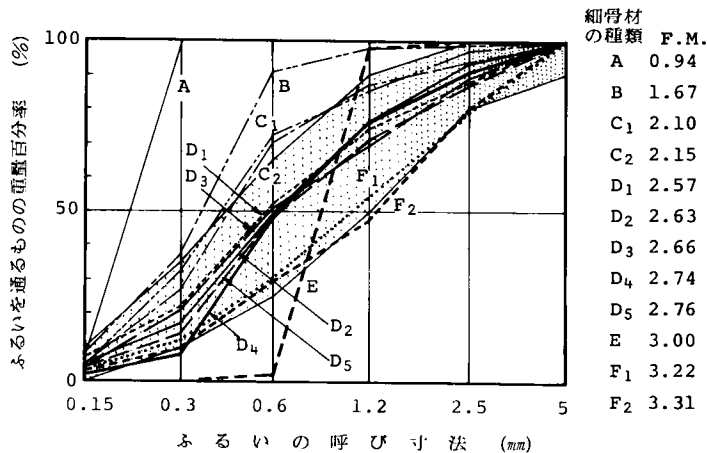


図4.6 細骨材の粒度曲線

用して表した。なお、空気量については、すべてプレーンモルタルとしたので無視した。

測定した配合は、レオロジー構成式を検討するために、一般的な配合の水セメント比およびセメント砂比になるようにし、一部特殊なものとし、本節(1)の実験計画で述べた4つのシリーズに分けて表4.5～4.8に示すものとした。

シリーズIでは、セメントペーストの品質と細骨材量がフレッシュモルタルの性質に及ぼす全般的な影響を調べるため、配合は広く変えセメント体積濃度  $v_c$  は0.300～0.575すなわち水セメント比  $W/C$  では0.74～0.23の12種に変えた。細骨材の粒度は  $D_1$  の一定とし、レオロジー定数の測定のできるフロー値が120～227の範囲になるように表4.5に示す細骨材体積濃度に変えた計46種の配合とした。なお、セメント砂比  $C/S$  は、 $\infty$  (ペースト) および1/0.11～1/4.2の範囲に変えた。

シリーズIIでは、細骨材の粒度がフレッシュモルタルのレオロジー定数に及ぼす影響を定量的に表すパラメータについて検討するため、セメントペーストの品質は、セメント体積濃度  $v_c = 0.400$  ( $W/C = 0.48$ ) の一定とした。細骨材の粒度は、粒度A, B,  $D_1$ ,  $D_5$  およびEの5種と広く変え、細骨材量をコンシステンシーに応じて各粒度とも表4.6に示すように数種以上とした計33種の配合とした。セメント砂比  $C/S$  は、1/1.8～1/4.1に変えた。

シリーズIIIでは、シリーズIIで検討した粒度およ

び細骨材量とレオロジー定数との関係に及ぼすセメントペーストの性質の違いの影響を検討するため次の配合とした。土木学会の標準粒度範囲の上, 下限付近, 中央付近および標準粒度範囲よりも細かな計4種の細骨材およびセメント体積濃度  $v_c$  で0.375～0.450,  $W/C$  では0.59～0.39の計4種に変えた。セメント砂比  $C/S$  は、1/2.0～1/3.9の範囲で、表4.7に示す計52種の配合とした。

シリーズIVでは、シリーズIIIで検討したセメントペーストの性質、細骨材の粒度および量がレオロジー定数に及ぼす影響を定量化し、これらを要因とするフレッシュモルタルのレオロジー構成式を検討するため表4.8に示すように、セメント体積濃度  $v_c$  は0.350～0.450,  $W/C$  では0.59～0.39の5種、細骨材粒度は、土木学会の標準粒度範囲の上限, 中央および下限付近の粒度  $C_1$ ,  $D_3$  および  $F_1$  の3種、細骨材量は、レオロジー定数が測定できるフロー値110～250の範囲で、しかも一般のモルタルやコンクリートに使われている配合になるように細骨材体積濃度  $v_s$  を0.40～0.60の5種に変えた計70種の配合とした。なお、セメント砂比  $C/S$  は、1/1.8～1/5.1に変えた。

以上4つの実験シリーズのすべての配合要因の組合せを表4.11に示す。

表4.11 モルタルの配合要因および使用細骨材との組合せ

$\frac{v_g}{v_g + W/C}$	0.300	0.325	0.350	0.375	0.400	0.425	0.450	0.475	0.500	0.525	0.550	0.575
$v_g$	0.74	0.66	0.59	0.53	0.48	0.43	0.39	0.35	0.32	0.29	0.26	0.23
0.050										D <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>
0.100										D <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>
0.150										D <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>
0.200										D <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>
0.250										D <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>
0.300										D <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>
0.350										D <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>
0.375					A <sub>4</sub> B							
0.400					A <sub>4</sub> B, C <sub>1</sub> , D <sub>3</sub> , F <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> , D <sub>3</sub> , F <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> , D <sub>3</sub> , F <sub>1</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>		
0.408				C <sub>1</sub> , D <sub>3</sub>	A							
0.416					A							
0.425					A <sub>4</sub> B			B, C <sub>2</sub> , D <sub>2</sub> , F <sub>2</sub>				
0.440					B							
0.450		C <sub>1</sub> , D <sub>3</sub>		C <sub>1</sub> , D <sub>3</sub> , F <sub>1</sub>	A <sub>4</sub> B, C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> , D <sub>2</sub> , D <sub>3</sub> , F <sub>1</sub> , F <sub>2</sub>	B, C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> , D <sub>2</sub> , D <sub>3</sub> , F <sub>1</sub> , F <sub>2</sub>	C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> , D <sub>2</sub> , D <sub>3</sub> , D <sub>4</sub> , F <sub>1</sub> , F <sub>2</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>		
0.460					B							
0.475					B, C <sub>2</sub> , D <sub>2</sub> , F <sub>2</sub>	B, C <sub>2</sub> , D <sub>2</sub> , F <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> , D <sub>2</sub> , F <sub>2</sub>					
0.500		C <sub>1</sub> , D <sub>3</sub> , F <sub>1</sub>	B <sub>1</sub> , C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> , D <sub>2</sub> , D <sub>3</sub> , F <sub>1</sub> , F <sub>2</sub>		B <sub>1</sub> , C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> , D <sub>1</sub> , D <sub>2</sub> , D <sub>3</sub> , D <sub>4</sub> , E, F <sub>1</sub> , F <sub>2</sub>	B <sub>1</sub> , C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> , D <sub>2</sub> , D <sub>3</sub> , D <sub>4</sub> , F <sub>1</sub> , F <sub>2</sub>	C <sub>1</sub> , D <sub>3</sub> , D <sub>4</sub> , F <sub>1</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>			
0.515					D <sub>1</sub>							
0.525				B, C <sub>2</sub> , D <sub>2</sub> , F <sub>2</sub>	B, C <sub>2</sub> , D <sub>1</sub> , D <sub>2</sub> , D <sub>3</sub> , E, F <sub>2</sub>							
0.530					D <sub>1</sub>							
0.540					D <sub>1</sub> , D <sub>3</sub> , E							
0.550		C <sub>1</sub> , D <sub>3</sub> , D <sub>4</sub> , F <sub>1</sub>	B <sub>1</sub> , C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> , D <sub>2</sub> , D <sub>3</sub> , D <sub>4</sub> , F <sub>1</sub> , F <sub>2</sub>		B <sub>1</sub> , C <sub>1</sub> , D <sub>1</sub> , D <sub>3</sub> , D <sub>4</sub> , D <sub>5</sub> , E, F <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> , D <sub>3</sub> , D <sub>4</sub> , F <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> , D <sub>3</sub> , D <sub>4</sub> , F <sub>1</sub>	D <sub>4</sub>				
0.560					D <sub>1</sub>							
0.575					D <sub>1</sub> , D <sub>3</sub> , E							
0.600	D <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>	C <sub>1</sub> , D <sub>3</sub> , D <sub>4</sub> , F <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> , D <sub>3</sub> , D <sub>4</sub> , F <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> , D <sub>3</sub> , D <sub>4</sub> , D <sub>5</sub> , F <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> , D <sub>3</sub> , D <sub>4</sub> , F <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> , D <sub>3</sub> , F <sub>1</sub>					

(注) A<sub>4</sub>, F<sub>2</sub>は、表4・10に示す測定した相対比の材料を用いる。

### (5) コンシステンシーの測定

モルタルのコンシステンシーは、フロー試験で測定されており、コンクリートに対しては、スランブ試験やVB試験で測定されている。これらの試験方法は、いずれも装置が比較的簡単に測定もしやすく用いられている。これらの測定値とレオロジー定数との間に相関関係があれば、レオロジー定数の指標として用いることができるので、本実験では、モルタル用のフロー値、スランブ値およびVB値を測定した。

フロー値は、JIS R5201に従って練り混ぜ後すぐに測定した。フロー値としては、JISに規定されているフロー値(以下FL<sub>15</sub>と書く)およびフローコーンを取り除いた直後の静定フロー値(以下FL<sub>0</sub>と書く)とを測定した。

スランブ試験やVB試験は、フレッシュコンクリートのコンシステンシーを測定するために用いられており、1試験に必要な試料は多量となる。そこで、この試料の量を少なくできる利点を持つコンクリート用のこれらの試験装置の1/2の縮尺のスランブコーンおよびVB試験用容器および円板を作製し、モルタルのコンシステンシーを測定するとともに、これらの試験によってコンシステンシーの違いが測定できるかどうかを検討した。

モルタル用の縮尺1/2のスランブコーンおよび突き

棒は、図4.7に示すもので、コーン、突き棒はともにコンクリート用の1/2の寸法とし、JIS A1101の方法に準じて3層で各層25回突き棒で突き、1/2スランブ値SL<sub>1/2</sub>を測定した。

VB試験装置は、図4.8に示す1/2縮尺のもので、測定方法はフルスケールのコンクリート用と同一とした。振動台は、振動数3600rpm最大加速度2gとした。

1/2スランブ値およびフロー値は、すべての配合について、練り混ぜ直後に測定し、VB値は、シリーズIおよびIIIの配合について測定した。

なお、スランブ値やフロー値は、次に述べるレオロジー定数を測定する際の荷重の大きさを決める指

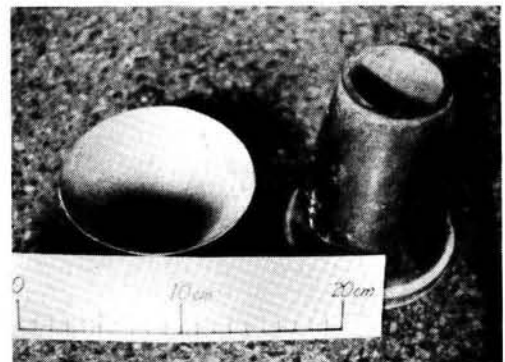


図4.7 1/2スケールのスランブ試験装置





図4.8 1/2スケールのVB試験装置

標として用い、配合の計量ミスなどのチェックにも利用した。

また、練り混ぜ終了後すぐに棒状温度計で試料温度を測定した。

#### (6) レオロジー定数の測定

フレッシュモルタルのレオロジー定数すなわち降伏値および塑性粘度は、第3章3.4.3で述べた平行板プラストメータⅢ型を用いて測定した。平行円板の直径は30cm、試料高さ約3cmとし、試料のコンシステンシーに応じて最初の変形速度が0.2～0.4 mm/sとなる大きさの载荷重錘を用いて、第3章3.5で述べた方法に従って本項(5)のコンシステンシーを求めた後すぐに測定を行った。

測定室の温度は、なるべく20℃近くになるようにし、試料温度が20℃から大きくはずれないように努めた。

測定手順は、練り混ぜ、コンシステンシーの測定を含めて各配合とも同一とし、注水後約8分にレオロジー定数の測定を開始した。

レオロジー定数は、第3章3.5で述べた方法を用いて求めた。

なお、以上のすべての配合については、日を変え

て2回測定し、その平均を各配合の測定値とした。

#### (7) 細骨材の比表面積の測定

細骨材の粒度および量を同時に1つの数値で表せるものとして細骨材の表面積が考えられる。

骨材の表面積を測定する方法としては、ふるい分析法<sup>4-23)</sup>、透水法<sup>4-24)</sup>、溶解法<sup>4-25)</sup>、投影法<sup>4-25)</sup>、被膜法<sup>4-26)</sup>、付着法<sup>4-27)</sup>などがある。しかし、モルタルに使用される細骨材のように比較的粒子の寸法が小さくしかも不規則な粒子の表面積を正確に測定する方法は非常に困難である。本節では、細骨材を対象としているので、前記の方法のうち比較的簡単な方法として、ふるい分析法および透水法を用いて細骨材の表面積を測定した。以下この2方法による測定について述べる。

##### (i) ふるい分析法

この方法は、各寸法の粒子の形状がほぼ相似形であるときに適用できる近似法であり、ふるい分け試験による各寸法の粒子の構成成分率を用いて計算によって求める方法である。

いまある寸法(径 $l_i \sim l_{i+1}$ )の平均径を

$$d_{i,i+1} = \sqrt{l_i \cdot l_{i+1}} \quad (\text{m}) \quad (4.13)$$

とすると、絶対体積に対する比表面積 $S_{i,i+1}(\text{m}^2/\text{m}^3)$ は、

$$S_{i,i+1} = \frac{m}{d_{i,i+1}} \quad (4.14)$$

で与えられる。ここで $m$ は、主として骨材の形状によって決まる定数である。実際に用いられる砂のような不規則な粒子の場合には、一つの形状でもって表すことには無理があるが、簡単であること、相対的な違いを表現できればよいことおよび表面積に大きな寄与をする小さな粒子の形状は球に近いことを考慮して、本研究では骨材の形状を球と仮定した。したがって、 $m$ は、

$$S_{i,i+1} = \frac{4\pi \left(\frac{d_{i,i+1}}{2}\right)^2}{\frac{4}{3}\pi \left(\frac{d_{i,i+1}}{2}\right)^3} = \frac{6}{d_{i,i+1}} \quad (4.13)$$

であるので6となる。

比表面積 $S$ は、ふるい分けを行ったふるいの呼び

寸法および各ふるい間にとどまる質量分率 $p_{i,i+1}$ を用いて次式で求めた。その結果は、表4.10および表4.12に示す。

$$S = \sum_{i=1}^n S_{i,i+1} \cdot p_{i,i+1} \quad (4.14)$$

## (ii) 透水法

この方法は、容器の中に詰めた試料の透水率を測定することによって試料の表面積を求めるものである。透水率の測定方法としては、定水位法、変水位法、水平法などがあるが、細骨材の粒子寸法を考慮して定水位法を採用した。

使用した定水位透水装置は、JIS A1218に規定されたものであり、測定方法も同規格に従った。その測定状況を図4.9に示す。



図4.9 定水位透水法による細骨材の表面積の測定状況

透水率から表面積を算定する式は、Carman<sup>4-28)</sup>Zunker<sup>4-28)</sup>Loudon<sup>4-24)</sup>などが提案している。本実験では、測定値も少なくなくてよく簡単な次の Loudon の実験式<sup>4-24)</sup>を用いた。

$$\log(kS) = 1.365 + 5.15n \quad (4.15)$$

ただし、 $k$ ：透水係数( $\text{cm}^2/\text{s} \cdot \text{cm}^2$ )

$S$ ：比表面積( $\text{cm}^2/\text{cm}^3$ )

$n$ ：空隙率

透水率の計算方法は JISA1281 に従って求め、Loudon の式の基準温度は $10^\circ\text{C}$ なので、本実験で求めた透水率 $k_t$ に温度補正を行って $k_{10}$ を算出し、式(4.15)を用いて比表面積を計算した。なお、温度補正は、Poiseuille の水の粘性係数と温度との関係式より、測定時の水の粘性係数 $\eta_t$ と水温 $10^\circ\text{C}$ の粘性係数 $\eta_{10}$ との逆比 $\frac{\eta_{10}}{\eta_t}$ を $k_t$ に乗じて行った。

各細骨材の比表面積は、各粒径にふるい分け、各粒径について5回透水率を測定し、その平均を測定値として各粒径の比表面積を前述のようにして算出し、各粒径の割合を乗じて求めた。なお、 $0.074\text{mm}$ 以下の粒子については無視した。この結果は表4.12に示す。

表4.12 細骨材の比表面積

細骨材の種類	ふるい分析法 ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )	透 水 法 ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )
A	29 981	34 747
B	20 941	24 490
C <sub>2</sub>	17 271	18 469
D <sub>1</sub>	14 689	15 426
D <sub>2</sub>	13 331	13 741
D <sub>5</sub>	12 301	13 438
E	7 140	8 410
F <sub>2</sub>	9 130	9 721

この表に示されているように、粒度 $C_2 \sim F_2$ までの細骨材については、ふるい分析法によるものと透水法によるものとが比較的良好に一致している。しかし、粒度の細かい細骨材AおよびBでは、透水法による結果の方がかなり大きい値を与えているが、細骨材の種類による大小の傾向は同じである。

したがって、本実験では、細骨材の表面積としては、より簡便なふるい分析法による値を用いることとした。

## (8) 細骨材の実積率の測定

絶対乾燥状態の各細骨材の実積率を JIS A1104 に従って測定した。その結果は、表4.10に示す。

### 4.3.3 実験結果およびその考察

#### (1) はじめに

フレッシュモルタルにおいてもペーストの場合と同様に、モルタルの温度や注水後の経過時間によって同一の配合であってもその性質が変化することはよく知られている。本実験においては、本章4.3.2で述べたように試料温度は測定中を含めて $20 \pm 2^\circ\text{C}$ になるようにし、各種の測定手順も同一として注水後約9分にはすべての測定が終了するようにしたので、本考察においては、これらの影響はないものとして整理検討する。

#### (2) セメント体積濃度および細骨材量とレオロジー一定数との関係

フレッシュモルタルの性質に及ぼす構成材料の特性や割合の影響を調べるため、まず細骨材の粒度や粒形を一定とし、その量およびセメントペーストの性質を変化させた実験シリーズ I の結果について述べる。

図4.10および図4.11に見られるように、連続相であるペーストの性質すなわちセメント体積濃度 $v_c$ が一定であると細骨材の量の増加とともにレオロジー一定数は大きくなっている。逆に細骨材量を一定とすると、図4.12および図4.13に示されているようにセメント体積濃度が高くなるとレオロジー一定数は大となっている。

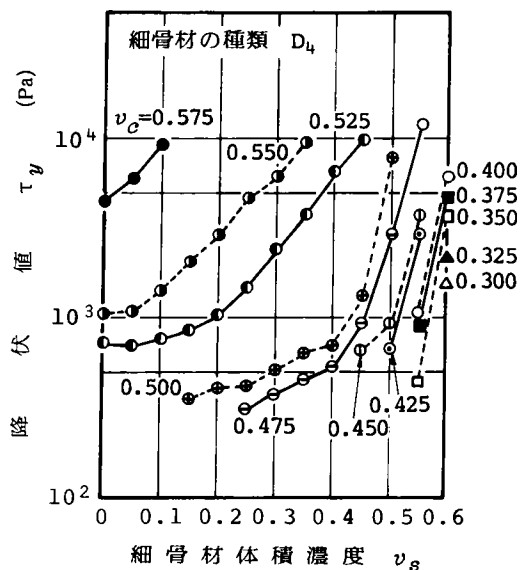


図4.10 細骨材体積濃度と降伏値との関係（シリーズ I）

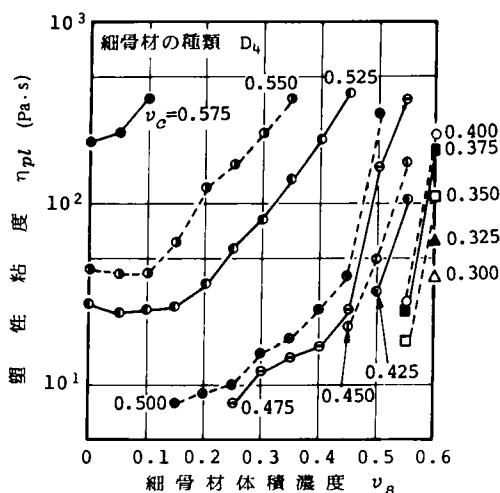


図4.11 細骨材体積濃度と塑性粘度との関係（シリーズ I）

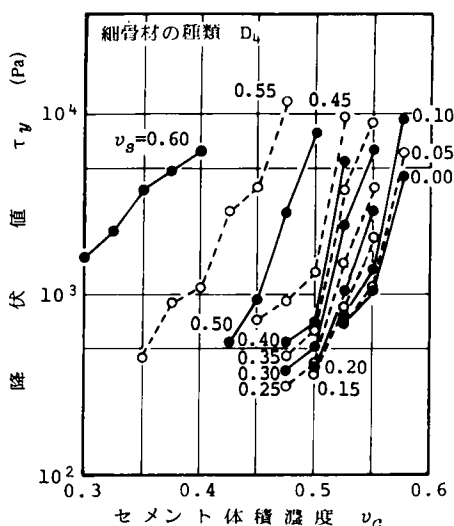


図4.12 セメント体積濃度と降伏値との関係（シリーズ I）

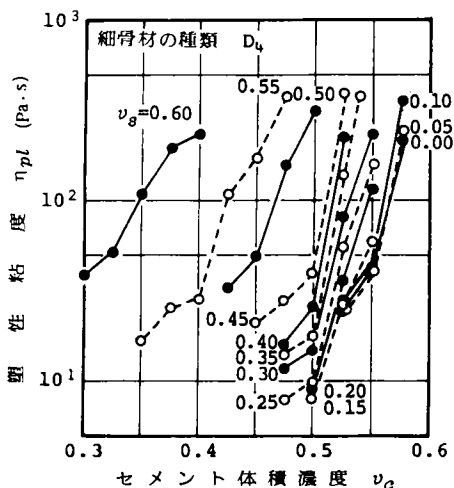


図4.13 セメント体積濃度と塑性粘度との関係（シリーズ I）

また、その増加の割合は、降伏値および塑性粘度の場合とも図4.10～図4.13に見られるように細骨材の体積濃度あるいはセメント体積濃度が高くなると大きくなっている。

このように、フレッシュモルタルのレオロジー定数は、セメントや細骨材の特性が同一でも、その配合によって変化し、変化の割合は、連続相の性質が一定でも分散相の量が多くなると大きくなり、分散相の量が一定では、連続相のレオロジー定数の増加の割合が大きくなるにつれて複合材料であるモルタルのレオロジー定数の増加割合も大きくなっている。

### (3) 細骨材粒度とレオロジー定数との関係

連続相であるセメントペーストの性質を一定とし、粒度が大きく異なる細骨材を用いたモルタルのレオロジー定数を図4.14および図4.15に示す。

これらの図に見られるように細骨材の体積濃度が同じすなわち配合が同じでも細骨材の粒度によって、レオロジー定数は大きく異なっている。同じ細骨材体積濃度に対する細骨材の粒度によるレオロジー定数の大小は、降伏値、塑性粘度とも同じ傾向となっている。表4.10に示した絶対容積  $1\text{ m}^3$  の細骨材の持つ表面積は、細骨材Aが  $29\,981\text{ m}^2/\text{m}^3$ 、Bが  $20\,941\text{ m}^2/\text{m}^3$ 、 $D_1$  が  $14\,689\text{ m}^2/\text{m}^3$ 、 $D_5$  が  $12\,301\text{ m}^2/\text{m}^3$ 、Eが  $7\,140\text{ m}^2/\text{m}^3$  となっており、この大小と同一細骨材量におけるレオロジー定数の大小の傾向とは一致している。

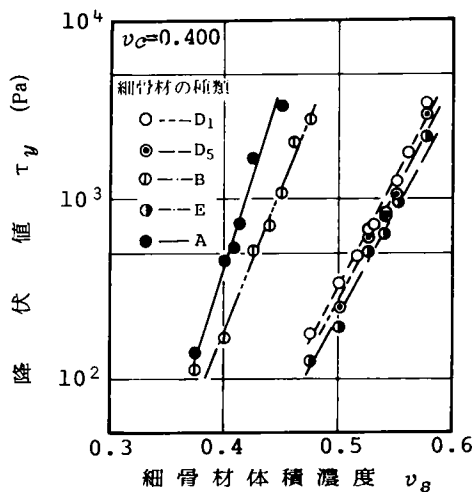


図4.14 細骨材体積濃度と降伏値との関係（シリーズII）

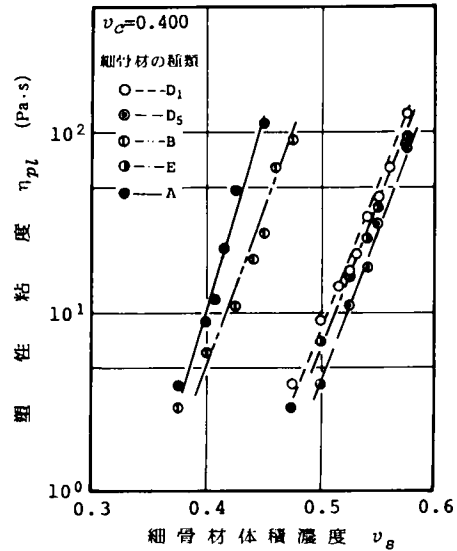


図4.15 細骨材体積濃度と塑性粘度との関係（シリーズII）

また、各ふるい目間の平均粒径を式(4.13)で求め各粒径の質量割合を乗じて求めた細骨材の平均粒径は、 $D_1$ 、Eおよび $D_5$ でそれぞれ1.02、0.86および1.08mmであり、細骨材AおよびBのそれは、それぞれ0.21および0.37mmとなっており、細骨材 $D_1$ 、 $D_5$ およびEを用いたモルタルのレオロジー定数が比較的似ており、細骨材AおよびBを用いたもののレオロジー定数とは大きく異なっている傾向と一致している。

このように、同一配合でも使用する細骨材の粒度が変化することによってレオロジー定数は異なり、同じ配合では、細かいすなわち比表面積の大きい細骨材を用いたモルタルのレオロジー定数が大となっている。

したがって、モルタルのレオロジー定数は、セメントペーストの性質すなわちセメント体積濃度と細骨材体積濃度とのみでは表すことができず、レオロジー構成式を求めるためには、細骨材の粒度と量とを表す指標が必要となる。

### (4) 固体粒子体積濃度とレオロジー定数との関係

本項(2)、(3)において、フレッシュモルタルは、ペーストと細骨材とから成る2相材料として整理したが、各相の量が変わりなくともペーストの性質が変わるすなわちペースト中のセメント粒子の体積濃度が変わるとモルタルの性質が変わっている。

セメント粒子は固体であるので、ここでは配合要因の影響を表すパラメータを検討するためモルタルを固体と水とから成る2相材料すなわちセメント粒子と細骨材を分散相、水を連続相と考える。シリーズIの細骨材の特性が一定すなわち粒度が同じ場合の固体粒子体積濃度  $v_{solid}$  とレオロジー定数との関係を図4.16および図4.17に示す。

これらの図は、図4.10および図4.11にそれぞれ対応するものであるが、セメント体積濃度  $v_c$  が0.50 ( $W/C = 0.32$ ) より小さい ( $W/C$  は大きい) 一般の配合として使用される場合には、セメント体積濃度の違いの影響が小さくなり、固体粒子体積濃度を用いてフレッシュモルタルのレオロジー構成式を求

められる可能性が考えられる。

シリーズIIの同一配合すなわち固体粒子体積濃度が同じ配合で細骨材の粒度が変化した場合には、図4.18および図4.19に示されているように、粒度が大きく異なる場合はレオロジー定数の違いが大となっているが、粒度がよく似た場合は、粒度によって規則的に差があるもののレオロジー定数は比較的大差ない値となっている。

以上の結果は、細骨材の粒度が一定あるいはペーストの性質が一定の場合であるので、細骨材の粒度およびペーストの性質を共に変化させた場合について検討することとする。図4.20および図4.21はその

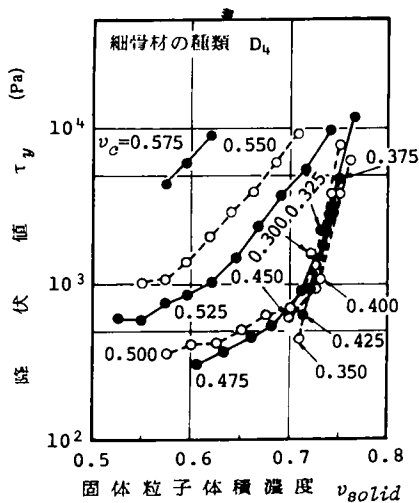


図4.16 固体粒子体積濃度と降伏値との関係 (シリーズI)

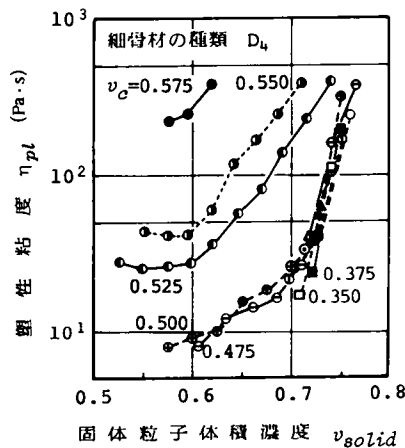


図4.17 固体粒子体積濃度と塑性粘度との関係 (シリーズI)

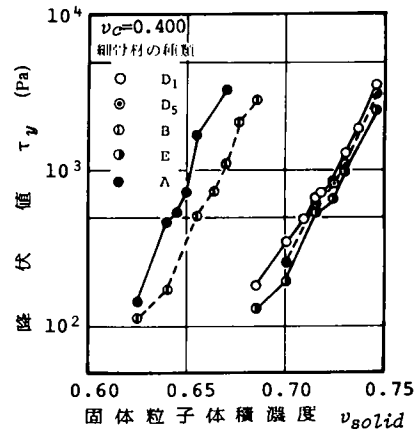


図4.18 ペーストの性質が一定の場合の固体粒子体積濃度と降伏値との関係 (シリーズII)

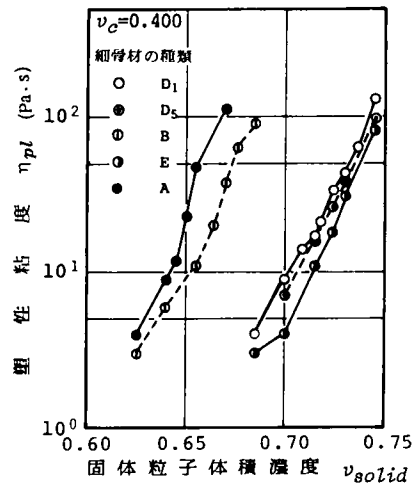


図4.19 ペーストの性質が一定の場合の固体粒子体積濃度と塑性粘度との関係 (シリーズII)

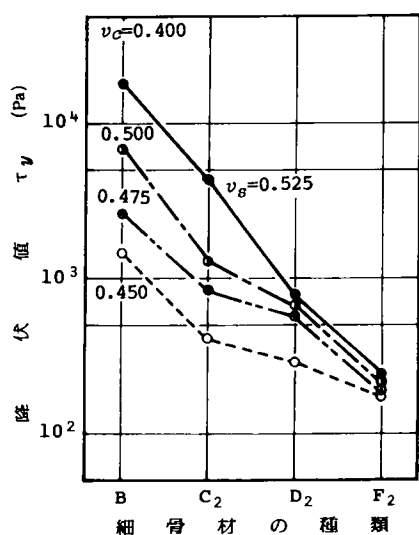


図4.20 細骨材の種類と降伏値との関係（シリーズⅢ）

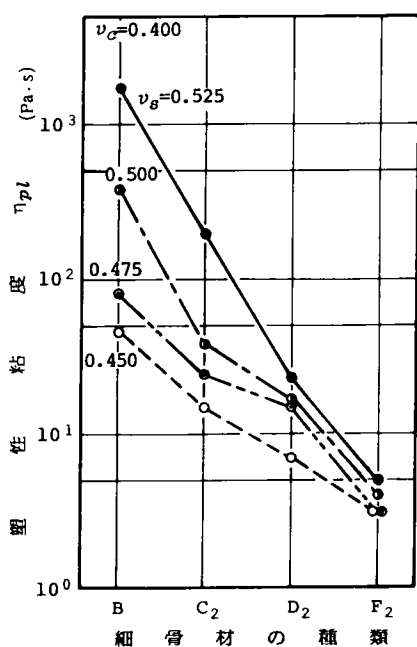


図4.21 細骨材の種類と塑性粘度との関係（シリーズⅢ）

1例(シリーズⅢ)を示すもので、1本の折れ線は、同じセメント体積濃度と細骨材体積濃度すなわち固体粒子体積濃度が一定で細骨材の粒度を変化させた場合の結果である。セメント体積濃度が0.400以外の場合も同様の傾向となっている。このように細骨材の粒度が異なれば、固体粒子体積濃度が同じでもレ

オロジー定数は相違している。しかも、図4.20および図4.21で用いた細骨材の粒度は、図4.6で示したように土木学会の標準粒度範囲の上限、中央、下限および標準粒度よりも細かいものであり、先の3つの細骨材は一般に使用される範囲のものである。

したがって、普通に用いられる細骨材の量および粒度を用いたフレッシュモルタルのレオロジー構成式の配合の影響を表すパラメータとしては、セメント粒子と細骨材の両方を加えた固体粒子体積濃度は不適当ということになる。そこで、次にフレッシュモルタルのレオロジー的性質に及ぼす構成材料の影響を表すパラメータについて検討する。

#### (5) フレッシュモルタルの性質に及ぼす細骨材の量および粒度の影響を表すパラメータ

以上述べてきたパラメータでは、フレッシュモルタルのレオロジー構成式を表すことができないことがわかった。そこで、ここではフレッシュモルタルをペーストと細骨材とから成る2相材料と考え、細骨材の量および特性がモルタルのレオロジー定数に及ぼす影響を表すパラメータについて検討する。

連続相であるセメントペーストと分散相である細骨材とから成るモルタルの性質が変化する機構を考える。このような2相材料の性質は、その各相の性質あるいは量が変化することによって異なることはよく知られている。モルタルの場合、相の量は細骨材体積濃度  $v_g$  のみで表せる。連続相であるペーストの性質は、セメントの特性が一定の場合にはセメントの体積濃度  $v_c$  のみで記述できる。したがって、細骨材の特性を表せるパラメータが必要となる。

細骨材のモルタルのレオロジー的性質に影響する主な特性は、粒度および粒形である。この粒度や粒形の違いを定量的に表すパラメータとして、粒度については粗粒率、平均粒径、粒度係数および標準偏差、比表面積などが用いられている(4-29)粒形については、直接的に表す方法として細長率、方形率、球形率、容積係数などの形状率(4-29)が提案されており、間接的な方法として、容積率(4-30-33)安息角(4-32-34)比表面積、フロー試験(4-33,35,36)などがある。しかし、粗粒率、平均粒径、標準偏差など粒度を表すパラメータは、同じ値に対して無数の粒度が存在し、比表面積、実積率、安息角、フロー試験などの粒形を表すパラメータには粒度の影響を含んでいる。また、各種の形状率は、細骨材のように粒子寸法の小さいと

きにはその測定が困難である。

そこで、本研究では、砕砂など天然砂に比べて極端に粒形の異なる天然砂を対象とし、粒形による影響は小さいとして無視し、粒度による影響のみについて検討することにする。

フレッシュコンクリートのワーカビリティに及ぼすセメントペーストの性質および骨材の特性の影響について、Kennedy<sup>4-37)</sup>は、プラスチックなコンクリート中のセメントペーストは、骨材間の空隙をみたしたうえ骨材の表面をおおわなければならないと述べている。そのおおった膜厚をKennedyは“Workability factor”と名付け、水セメント比が一定の場合、その膜厚が大きいほどワーカビリティが大きい。また、同一ワーカビリティをうる場合には、水セメント比の大きいものは小さいものより膜厚は小さくてよいと報告している。

Newman ら<sup>4-38)</sup>は、細粗骨材を混合した骨材の比表面積が一定であれば、ワーカビリティなどコンクリートの性質はほとんど変わらないと述べている。

徳光も<sup>4-39)</sup>フレッシュモルタルの細骨材の表面に付着するペーストの膜厚がモルタルの重要な性質を表す要素であると報告している。

以上のことは、すべて骨材の表面積がフレッシュモルタルの性質に及ぼす重要な要因であることを指摘している。

細骨材の表面積は、骨材の粒度の違いを表すことができ、しかも粒形の違いをも含ませうる可能性がある。したがって、単位体積のモルタル中の細骨材の総表面積は、細骨材の量、粒度さらには粒形の違いも表すことができることになる。

そこで、1 m<sup>3</sup>のモルタルに含まれている細骨材の総表面積を細骨材の量および粒度を表すパラメータとして、レオロジー定数との関係を、細骨材の粒度を変化させたシリーズIIおよびIIIについて図4.22～図4.25に示す。

これらの図に見られるように本実験の結果では、細骨材の総表面積とレオロジー定数との関係には、粒度の影響が大きく表れている。これは、骨材を球とし、直径が2倍異なるX、Y 2種すなわち直径が $d_x = 2d_y$ の骨材を考え、これらが同じ表面積を持つ場合には、骨材Yは骨材Xの4倍個あるので体積では、骨材Xが骨材Yの2倍となる。たとえば、シリーズIIの細骨材Aの平均径は0.21mmでBは0.37mm

であるので、ペーストの性質が同じ場合、表面積が同一のとき同じレオロジー定数を持つとすると、Aで細骨材体積濃度が0.4であればBでは大略0.8となることから説明される。

したがって、フレッシュモルタルの場合、モルタルのレオロジー定数に及ぼす細骨材の量と粒度の影響は、本実験のように粒度が大きく異なる場合には、細骨材の表面積のみでは表せないことになる。

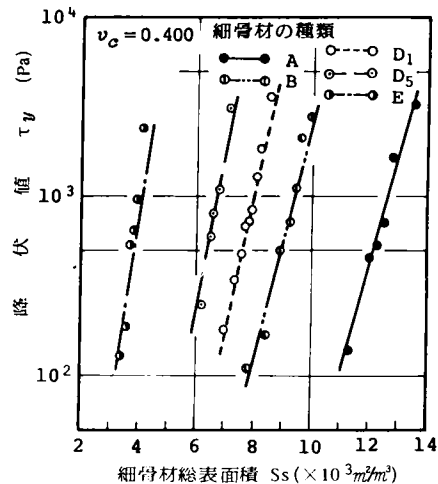


図4.22 細骨材総表面積と降伏値との関係（シリーズII）

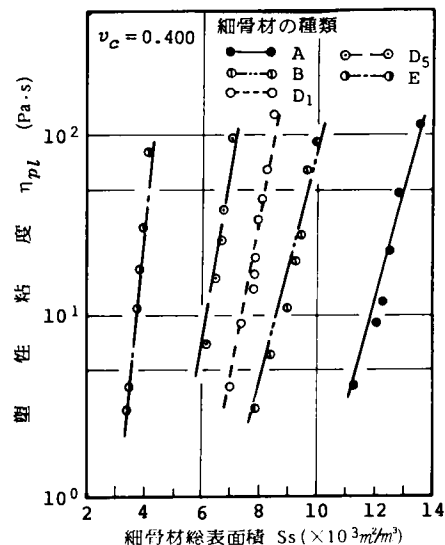


図4.23 細骨材総表面積と塑性粘度との関係（シリーズII）

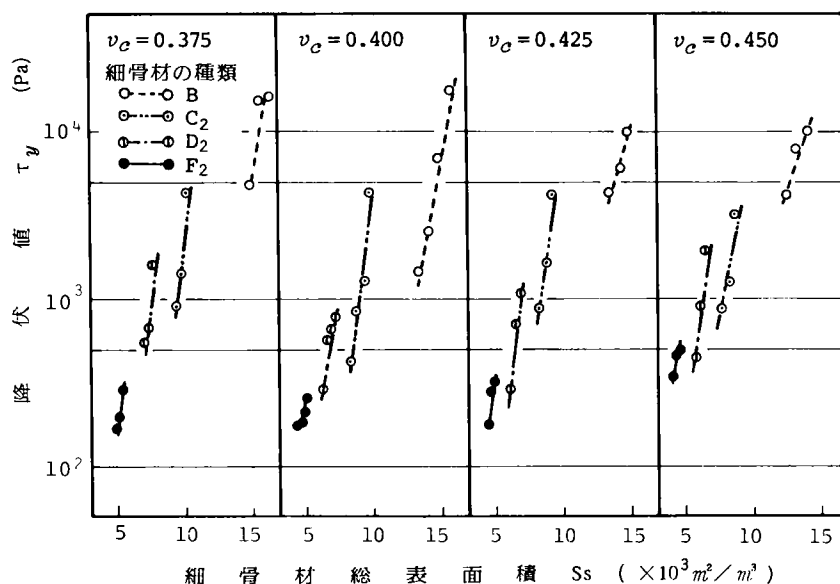


図4.24 細骨材総表面積と降伏値との関係（シリーズⅢ）

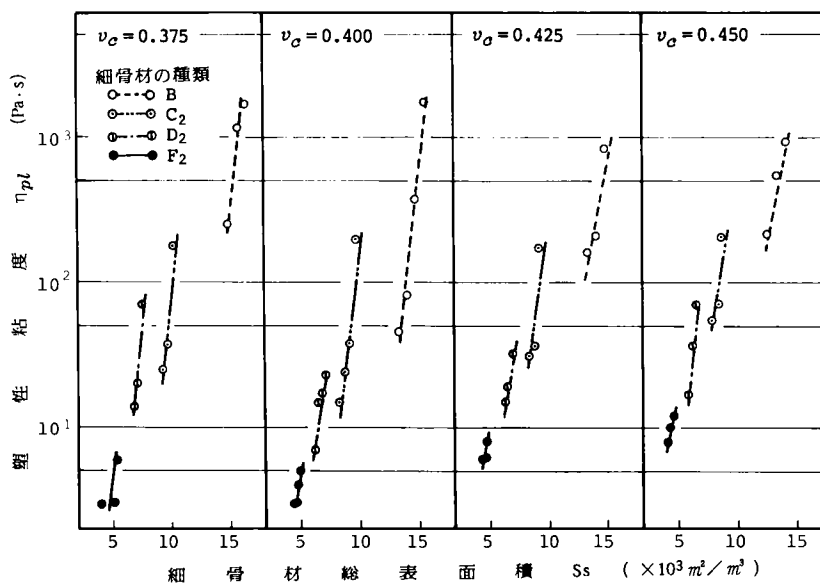


図4.25 細骨材総表面積と塑性粘度との関係（シリーズⅢ）

以上の議論においては、フレッシュモルタルの性質に及ぼすセメントペーストと細骨材との影響は、全く別別に作用し、モルタルの流動に際してこれらの相互作用はないものとしている。しかし、水、セメント粒子および細骨材粒子間には引力が作用し、流動中においても一体となっている部分の存在、細

骨材の空隙部分にあるペーストは、流動にあまり寄与しないなどいくつかのモデルが考えられ、モルタル中のペーストと細骨材の状態としては、図4.26のようなものが考えられる。

このモデルから考えられるモルタルのレオロジー的性質に及ぼすペーストおよび細骨材の影響を表す



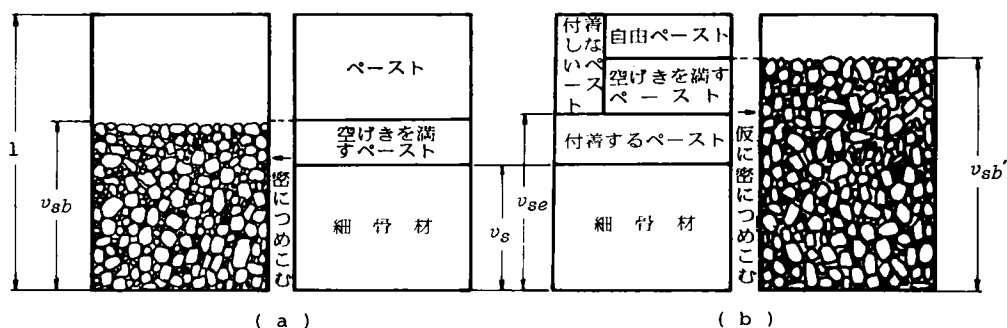


図4.26 細骨材とペーストの状態

パラメータとしては、次のようなものが考えられる。水分子、セメント粒子および細骨材粒子の寸法を考慮すると、最も粗いモデルではあるが、細骨材粒子のまわりにセメントペーストが付着し、これが一体となってあたかも分散相のように働くと考えこれと細骨材体積濃度を加えたみかけの細骨材体積濃度  $v_{se}$ 、細骨材の空隙をみたしたペーストは、流動には寄与しないと考えた細骨材を密に詰め込んだときのかさ体積濃度  $v_{so}$  およびこの両者の考え方を併用した付着ペーストのある細骨材を仮に密に詰め込んだときのかさ体積濃度  $v_{sb}'$  などが考えられる。

次にこれら3つのパラメータについて検討する。

#### (6) みかけの細骨材体積濃度とレオロジー定数との関係

モルタル中で細骨材と一体となって挙動するペーストがあるとした場合、まずこの付着するペーストの厚さがいくらであるか、また細骨材表面での状態がどのようなものであるかということが問題となる。ところが、この厚さを測定したり、その状態を観測することは非常に困難である。そこで、以下の仮定を設けることとする。

- (i) 付着ペースト厚さは、細骨材粒子の粒径の大小、粒形の凹凸にかかわらず同じ厚さである。
- (ii) セメントペーストの性質すなわちセメント体積濃度の高低にかかわらず付着ペースト厚さは同じである。

次にこの付着厚さについて検討する。

今、絶対容積  $1\text{ m}^3$  の細骨材の比表面積を  $S_s$ 、付着ペースト厚さを  $x$ 、細骨材の体積濃度を  $v_s$  とすると、体積濃度  $v_s$  の  $1\text{ m}^3$  のモルタルの付着ペースト量は、 $S_s x v_s$  となり、細骨材量は  $v_s$  となるので、付着ペーストを含めたみかけの細骨材量は  $S_s x v_s + v_s$  と

なる。

したがって、付着ペーストを細骨材と一体としたみかけの細骨材の実積率は、

$$\text{実積率} = S_s x v_s + v_s \quad (4.16)$$

となる。

表4.10を参考にして、比表面積が  $10\,000\text{ m}^2/\text{m}^3$  および  $20\,000\text{ m}^2/\text{m}^3$  の2種の単一の球を考える。球の半径をそれぞれ  $r_1$  および  $r_2$  とし、絶対体積  $1\text{ m}^3$  中の個数をそれぞれ  $n_1$  および  $n_2$  とすると、

$$\left. \begin{aligned} 4\pi r_1^2 n_1 &= 10\,000 \\ \frac{4}{3}\pi r_1^3 n_1 &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (4.17)$$

および

$$\left. \begin{aligned} \frac{\pi}{4} r_2^2 n_2 &= 20\,000 \\ \frac{4}{3}\pi r_2^3 n_2 &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (4.18)$$

より、 $r_1 = 0.3 \times 10^{-3}\text{ m}$  および  $r_2 = 0.15 \times 10^{-3}\text{ m}$  となる。

単一球の最密の充填状態での実積率は0.74、最粗充填状態では0.52であり、<sup>40)</sup>実際の細骨材の実積率の平均的な値は、表4.10より0.64として、 $1\text{ m}^3$  のなかにペーストが付着した細骨材を詰め込んだときも同じ実積率になるとして求めた付着厚さを、式(4.16)から求め表4.13に示す。

表4.13の理論付着ペースト厚さを参考にして、付着ペースト厚さを5、10および  $15\mu\text{m}$  と仮定して、みかけの細骨材体積濃度  $v_{se}$  を求め、これとレオロジー

表4.13 ベーストの理論付着厚さ

細骨材 体積濃度 $v_g$	細骨材の 比表面積 $S_s$ ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )	細骨材の 平均粒径 ( $\text{mm}$ )	細骨材の 実積率	ベーストの理論 付着厚さ $l$ ( $\text{mm}$ )
0.600	20 000	0.15	0.52	-0.013
			0.64	0.007
			0.74	0.023
	10 000	0.30	0.52	-0.007
			0.64	0.003
			0.74	0.012
0.550	20 000	0.15	0.52	-0.005
			0.64	0.016
			0.74	0.035
	10 000	0.30	0.52	-0.003
			0.64	0.008
			0.74	0.017

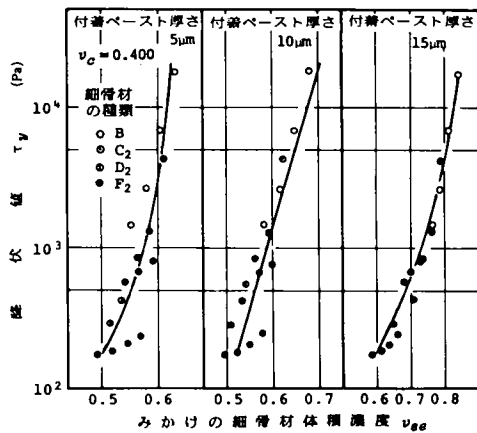


図4.27 付着ペースト厚を変えたみかけの細骨材体積濃度と降伏値との関係

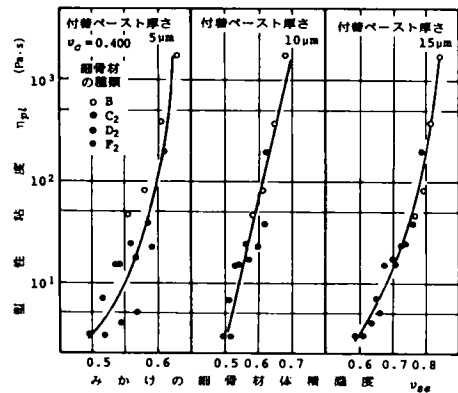


図4.28 付着ペースト厚を変えたみかけの細骨材体積濃度と塑性粘度との関係

一定数との関係の1例を図4.27および図4.28に示す。

これらの図に見られるように、この3つのなかでは付着ペースト厚さを15 $\mu\text{m}$ と仮定したものが一番高い相関を示しているが、曲線状になっている。付着厚さ10 $\mu\text{m}$ の場合は、相関の程度は15 $\mu\text{m}$ の場合よりも若干劣るがその関係は、ほぼ直線関係となっている。他の結果もほぼ同様の傾向を示している。

そこで、細骨材に付着し一体となってあたかも細骨材のように挙動する付着ペーストの膜厚を10 $\mu\text{m}$ とし、前述した細骨材のかき体積濃度  $v_{sb}$ 、付着ペー

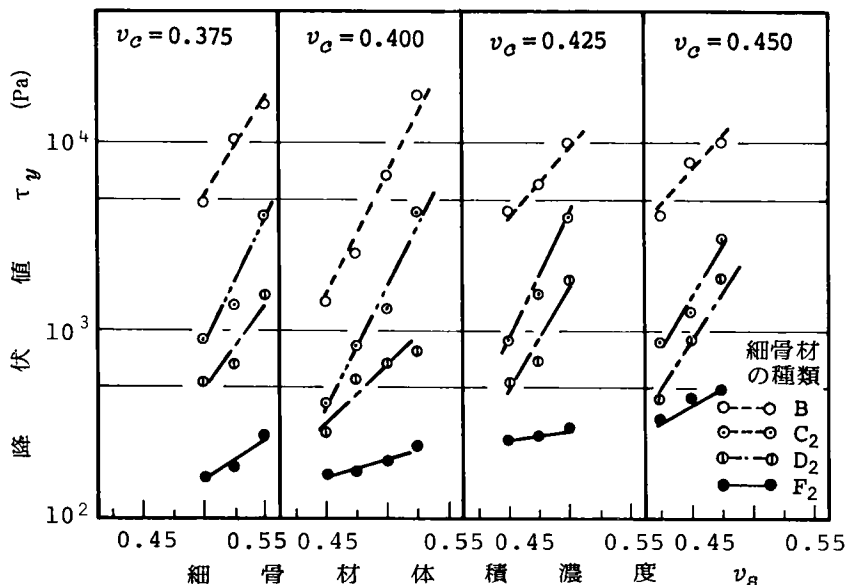


図4.29 細骨材体積濃度と降伏値との関係 (シリーズIII)

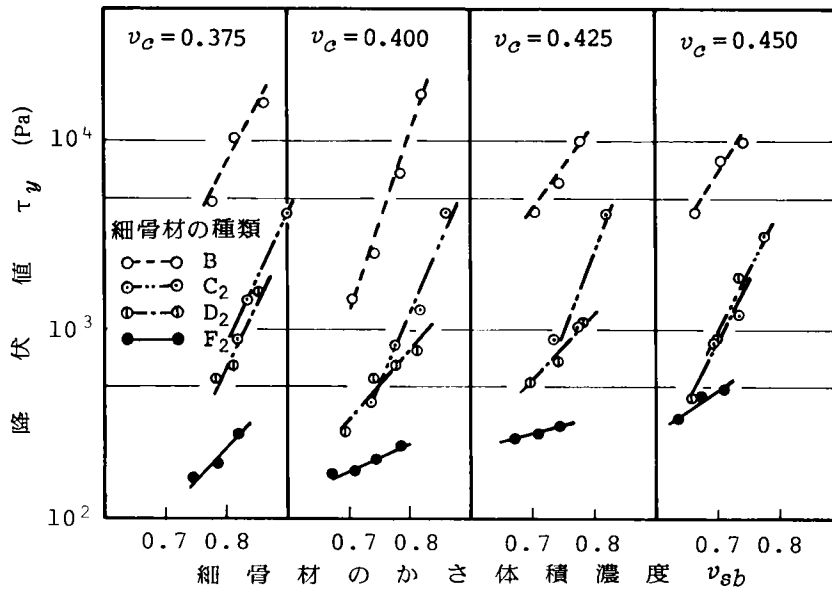


図4.30 細骨材のかさ体積濃度と降伏値との関係（シリーズⅢ）

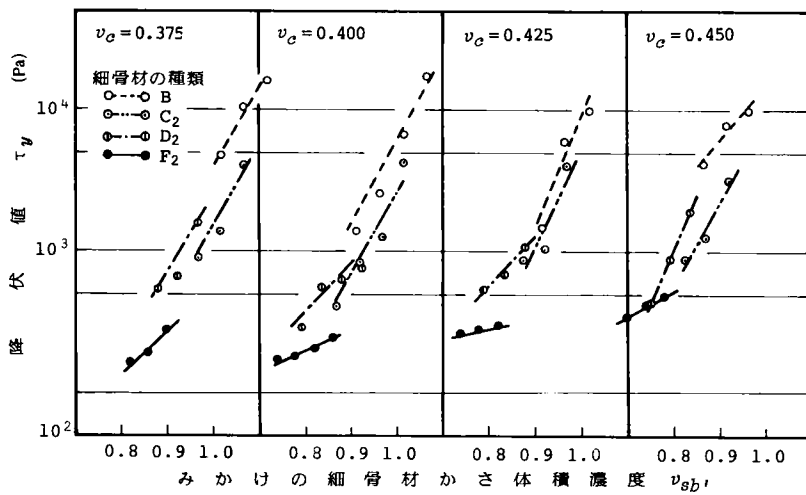


図4.31 みかけの細骨材かさ体積濃度と降伏値との関係（シリーズⅢ）

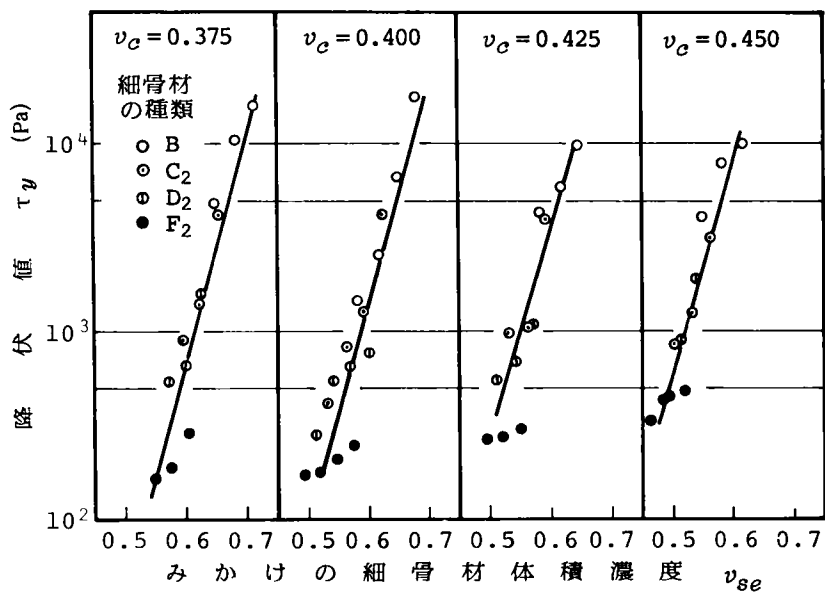


図4.32 みかけの細骨材体積濃度と降伏値との関係（シリーズⅢ）

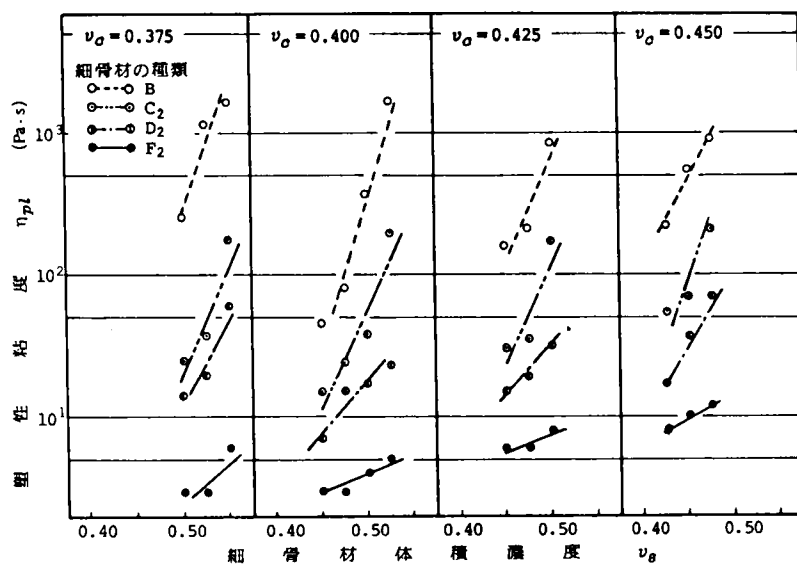


図4.33 細骨材体積濃度と塑性粘度との関係（シリーズⅢ）

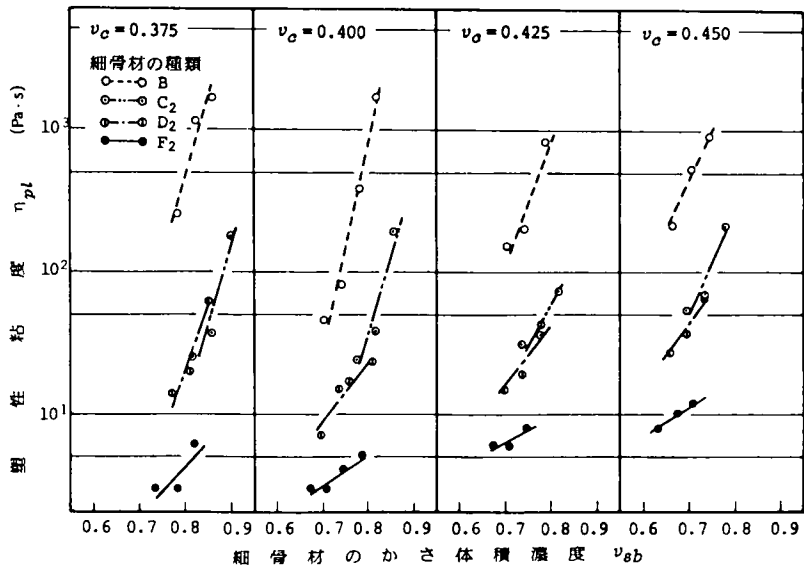


図4.34 細骨材のかさ体積濃度と塑性粘度との関係（シリーズⅢ）

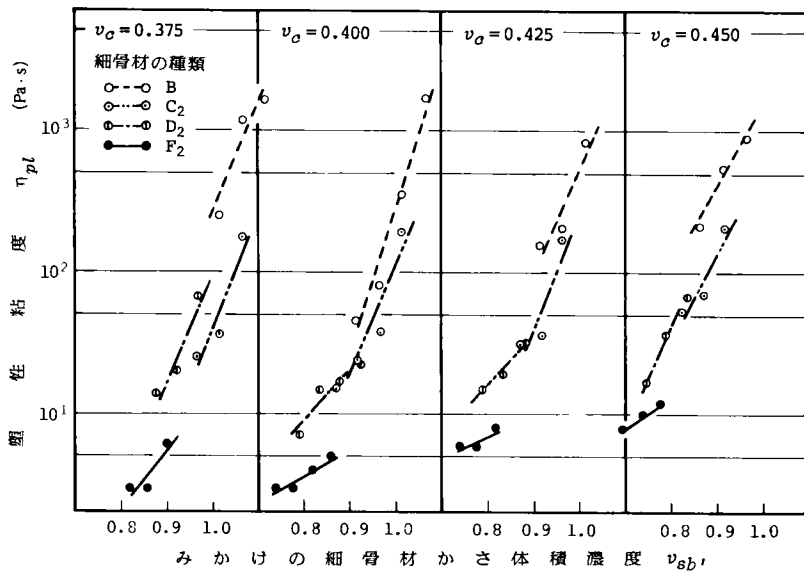


図4.35 みかけの細骨材体積濃度と塑性粘度との関係（シリーズⅢ）

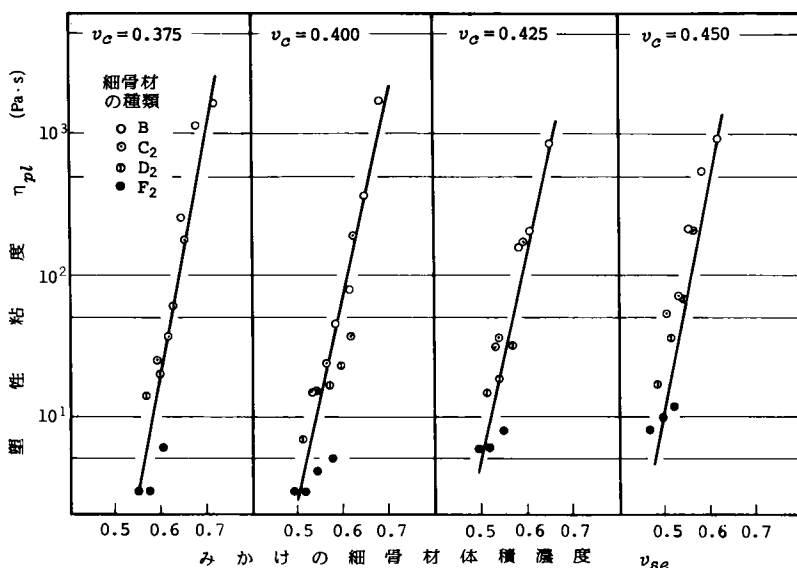


図4.36 みかけの細骨材体積濃度と塑性粘度との関係（シリーズⅢ）

スト厚さを $10\mu\text{m}$ としたみかけの細骨材かさ体積濃度 $v_{sb}'$ およびみかけの細骨材体積濃度 $v_{se}$ の3つのパラメータの適合性を検討するため、実験シリーズⅢの場合について、細骨材体積濃度 $v_s$ の場合も含めてレオロジー定数との関係を図4.29～図4.36に示す。

これらの図に見られるように、付着ペースト厚さを $10\mu\text{m}$ としたみかけの細骨材体積濃度 $v_{se}$ とレオロジー定数とは、それぞれ線形関係と近似できるが、他のパラメータでは、細骨材の種類すなわち粒度の違いによる影響が表れているので、以下、みかけの細骨材体積濃度を用いてフレッシュモルタルのレオロジー構成式を検討する。

#### (7) フレッシュモルタルのレオロジー構成式

(6)で述べたように細骨材の粒度が土木学会の標準粒度範囲であれば、みかけの細骨材体積濃度とレオロジー定数との間には高い相関があることがわかった。この付着ペースト厚さを $10\mu\text{m}$ としかたみかけの細骨材体積濃度 $v_{se}$ とレオロジー定数との関係は、図4.32および図4.36に示されているように、ペーストの性質すなわちセメント体積濃度 $v_c$ の大きさによってその傾きが異なっている。

このセメントペーストの性質の違いによる影響を調べるため、表4.8に示すようにセメント体積濃度

$v_c$ を0.350, 0.375, 0.400, 0.425および0.450、水セメント比では、0.59, 0.53, 0.48, 0.43および0.39の5種に変え、細骨材の粒度を土木学会の標準粒度範囲のほぼ上限、中央および下限になるように3種に変えたシリーズⅣの実験を行った。この結果を図4.37～図4.40に示す。

これらの図に示されているように、レオロジー定数と細骨材体積濃度との関係には、細骨材の粒度の影響が示されており、図4.38および図4.40に見られるように付着ペースト厚さを $10\mu\text{m}$ としたみかけの細骨材体積濃度との間には、粒度に関係なくセメントの体積濃度別にそれぞれ高い相関関係がある。

そこで、みかけの細骨材体積濃度 $v_{se}$ とレオロジー定数すなわち降伏値 $\tau_y$  (Pa)および塑性粘度 $\eta_{pl}$  (Pa·s)との関係式を

$$\tau_y = a_1 \exp(b_1 v_{se}) \quad (4.19)$$

$$\eta_{pl} = a_2 \exp(b_2 v_{se}) \quad (4.20)$$

とおき、セメントの体積濃度 $v_c$ 別に係数を求めると、表4.14のようになり、それぞれ高い相関係数をもって関係式が求まっている。

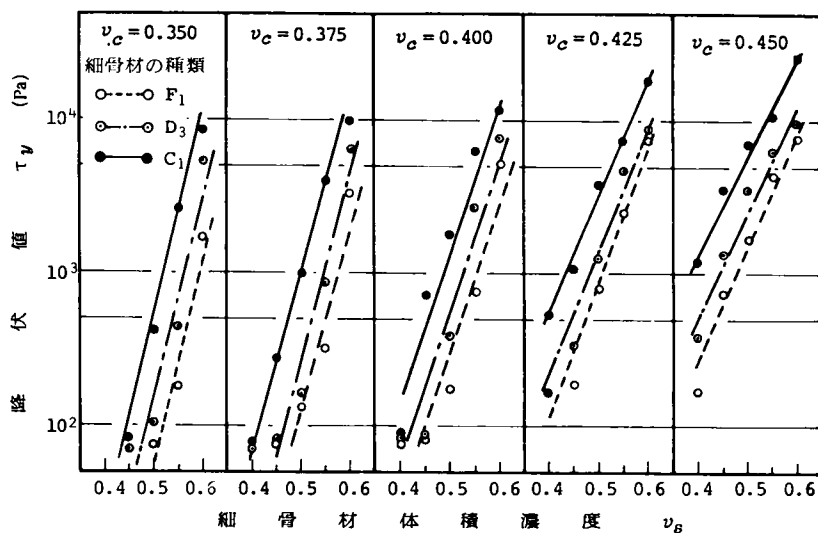


図4.37 細骨材体積濃度と降伏値との関係（シリーズⅣ）

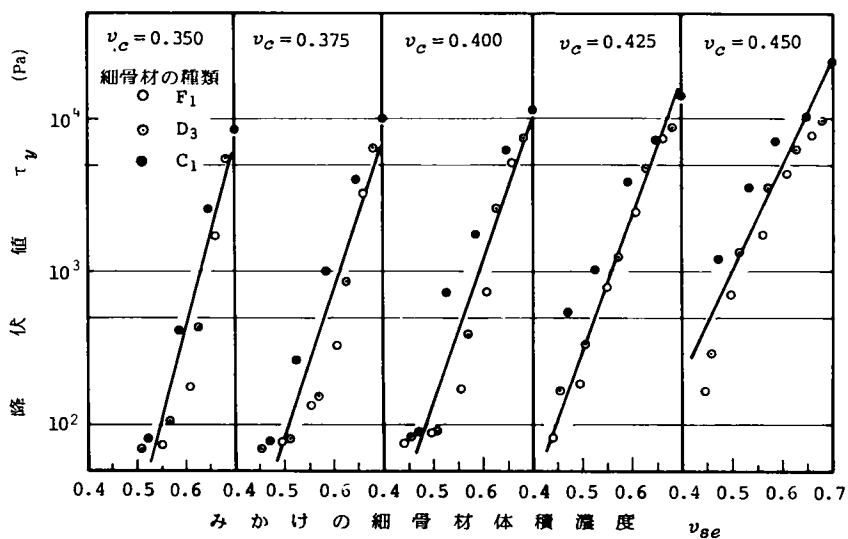


図4.38 みかけの細骨材体積濃度と降伏値との関係（シリーズⅣ）

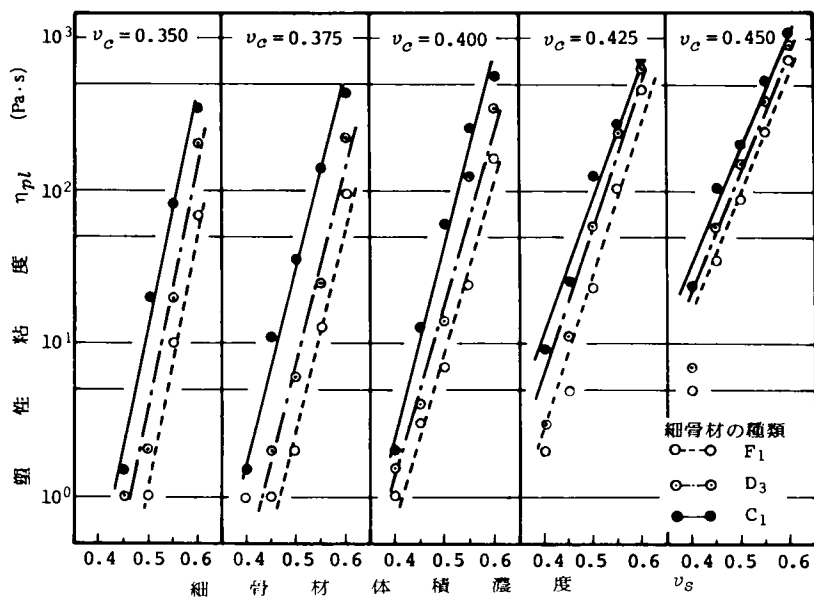


図4.39 細骨材体積濃度と塑性粘度との関係（シリーズⅣ）

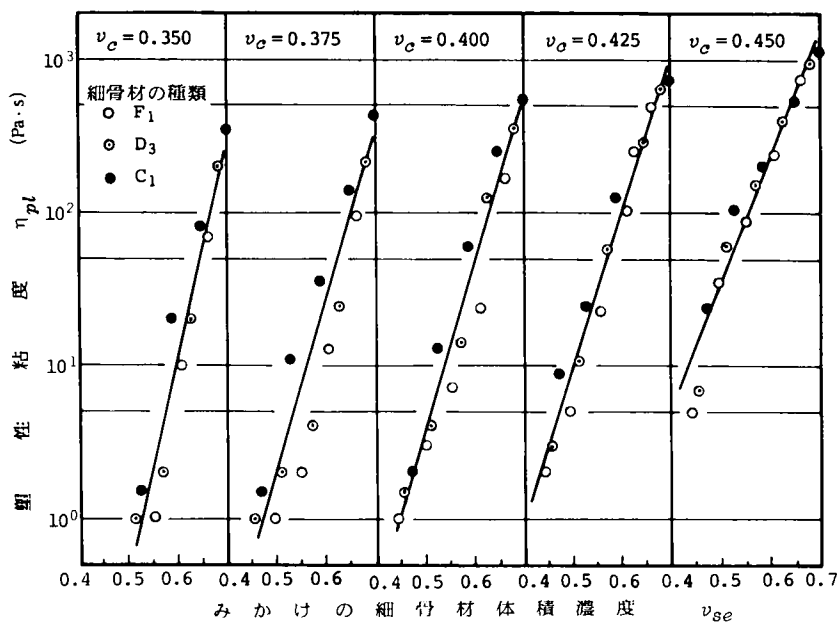


図4.40 みかけの細骨材体積濃度と塑性粘度との関係（シリーズⅣ）



表4.14 モルタルのレオロジー構成式の係数 (シリーズⅣ)

$v_c$	$\tau_y = a_1 \exp[b_1 v_{se}]$			$\eta_{pl} = a_2 \exp[b_2 v_{se}]$		
	$a_1$	$b_1$	相関係数	$a_2$	$b_2$	相関係数
0.350	$2.58 \cdot 10^{-5}$	27.7	0.935	$4.10 \cdot 10^{-8}$	32.4	0.965
0.375	$1.53 \cdot 10^{-3}$	21.9	0.906	$5.83 \cdot 10^{-6}$	25.5	0.945
0.400	$3.02 \cdot 10^{-3}$	21.6	0.949	$1.51 \cdot 10^{-5}$	24.9	0.980
0.425	$1.10 \cdot 10^{-2}$	20.5	0.949	$8.18 \cdot 10^{-5}$	23.4	0.980
0.450	$4.06 \cdot 10^{-1}$	15.8	0.922	$2.57 \cdot 10^{-3}$	19.1	0.965

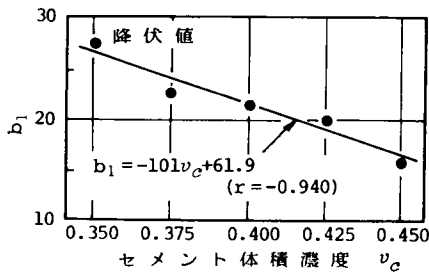


図4.41 セメント体積濃度と $b_1$ との関係 (シリーズⅣ)

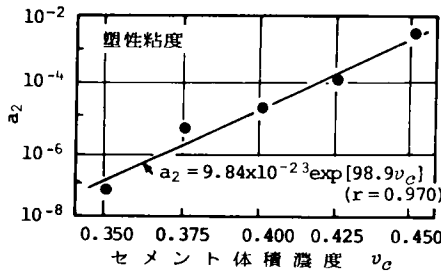


図4.42 セメント体積濃度と $a_2$ との関係 (シリーズⅣ)

この表に示されているように、各係数はセメントの体積濃度によって異なっており、セメント体積濃度 $v_c$ とこれらの係数との関係の1例を示すと図4.41および図4.42となる。このようにセメントの体積濃度 $v_c$ と各係数との間には、それぞれ相関があるので、この関係式を求めると、

$$a_1 = 5.49 \times 10^{-18} \exp[85.2 v_c] \quad (4.21)$$

$$(r = 0.965)$$

$$b_1 = -101 v_c + 61.9 \quad (4.22)$$

$$(r = -0.940)$$

$$a_2 = 9.84 \times 10^{-23} \exp[98.9 v_c] \quad (4.23)$$

$$(r = 0.970)$$

$$b_2 = -115 v_c + 71.7 \quad (4.24)$$

$$(r = -0.943)$$

とそれぞれ比較的高い相関係数で関係式が得られる。

したがって、これらの係数を式(4.19)および式(4.20)にそれぞれ代入すると、フレッシュモルタルのレオロジー定数と配合要因との一般化された関係式として、

$$\tau_y = 5.49 \times 10^{-18} \exp[(85.2 - 101 v_{se}) v_c + 61.9 v_{se}] \quad (4.25)$$

$$\eta_{pl} = 9.84 \times 10^{-23} \exp[(98.9 - 115 v_{se}) v_c + v_{se}] \quad (4.26)$$

ここで、 $\tau_y$ は降伏値(Pa)、 $\eta_{pl}$ は塑性粘度(Pa·s)、 $v_c$ はセメント体積濃度( $= \frac{c}{w+c}$ )および $v_{se}$ はみかけの細骨材体積濃度( $= \frac{v_s + v_s S_s t}{w+c+s}$ ただし、 $v_s$ ; 細骨材の体積濃度  $= \frac{s}{w+c+s}$ ,  $t$ ; 細骨材

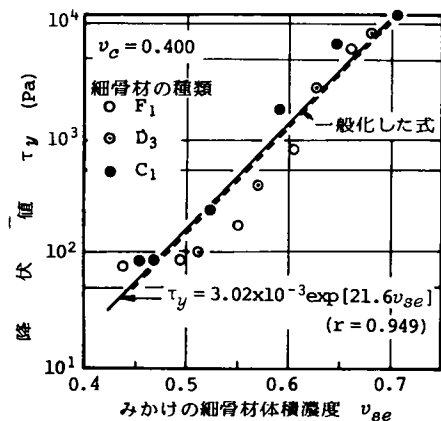


図4.43 みかけの細骨材体積濃度と降伏値との関係 (シリーズⅣ)

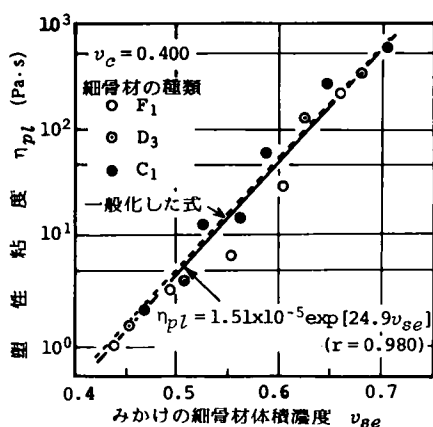


図4.44 みかけの細骨材体積濃度と塑性粘度との関係  
(シリーズⅣ)

の付着ペースト厚さ =  $10\mu\text{m}$ ,  $S_g$ ; 絶対体積  $1\text{m}^2$  の細骨材の比表面積 ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ ) が得られる。

この式の適合精度の1例として、セメント体積濃度  $v_c = 0.400$  の場合、一般化した式(4.25)および式(4.26)とセメント体積濃度別に求めたものとはそれぞれ図4.43および図4.44に示されているようによく一致しており、一般化したフレッシュモルタルの配合要因および細骨材の粒度が変化した場合のレオロジー構成式が式(4.25)および式(4.26)で求まっていることが確かめられている。

しかし、以上の議論における問題点としては、本考察においてはフレッシュモルタルを細骨材に付着しないペーストと付着ペーストを含む細骨材とから成る2相材料と考えているのであって、レオロジー構成式を求めた場合ペーストの性質によって係数が異なることは構成式としては不適切である。

この原因としては、1つにここでは付着ペースト厚さをセメント体積濃度に関係なく一定としていることが考えられる。また、セメント体積濃度の違いによるレオロジー定数の大小の係数に及ぼす影響は、セメントペーストのレオロジー定数でモルタルのレオロジー定数をそれぞれ除した相対レオロジー定数で表すことによって消去できる可能性が考えられる。本実験の場合、同じ測定装置でベースとなるセメントペーストのレオロジー定数を装置の構造上測定することができず、図4.4および図4.5に示したように研究者や測定装置によってペーストのレオロジー定数には大きな相違があり、これらと結びつけられな

い結果となっている。

しかし、図4.4および図4.5に示されているように、ペーストのレオロジー定数の絶対値そのものは研究者によって異なっているものの、セメント体積濃度に対する増加割合は、一般に使用されている水セメント比の範囲 ( $W/C = 0.74 \sim 0.32$ ,  $v_c = 0.3 \sim 0.5$ ) では、どの研究者による結果も、ほぼ直線的になっているので、セメント体積濃度別にみかけの細骨材体積濃度とレオロジー定数とは直線関係となり、相対レオロジー定数との間にも係数は異なるが同様の関係式が得られることになる。

このように、ここで求めたフレッシュモルタルのレオロジー構成式には若干の不備があるものの、モルタルのレオロジー構成式の基本的な型としては有効である。なお、この不備については、今後の検討課題であろう。

また、角田ら<sup>(4-13)</sup>および菊川<sup>(4-22)</sup>の提案しているレオロジー構成式は、いずれも相対粘度で求めており、細骨材の体積濃度0.40程度で角田らは、相対粘度および相対降伏値とも4~8という値<sup>(4-13)</sup>を与え、菊川は0.4に対しては10, 0.45で約20という大きさである。本実験の結果は、相対値を求めることはできないが、細骨材体積濃度0.1~0.4でレオロジー定数は2オーダーすなわち100倍位の差があり異なった結果となっている。

この理由については、はっきりしないが角田ら<sup>(4-13)</sup>菊川ら<sup>(4-22)</sup>のレオロジー定数測定装置は、回転粘度計であり、この測定装置が違うことが1つの原因と考えられ、今後検討する必要がある。

#### (8) フレッシュモルタルの降伏値と塑性粘度との関係

Tattersallによれば<sup>(4-14)</sup>フレッシュコンクリートの流動曲線は、図2.8のように配合によってその傾きが異なり、この直線と考えられる流動曲線を決定するためには2点での値を求めなければならないとしている。したがって、決定された直線からは、コンクリートをビンガム物体と近似するならば2個の物性定数が求められ、これらによって逆に直線が決定される。この2つの物性定数が、降伏値と塑性粘度であり、配合によって流動曲線の傾きが異なるならば、これらの定数間には相関関係はないことになる。

ところが、プレーンモルタルに関する本実験の結果では、図4.10~図4.21に示されているように降伏

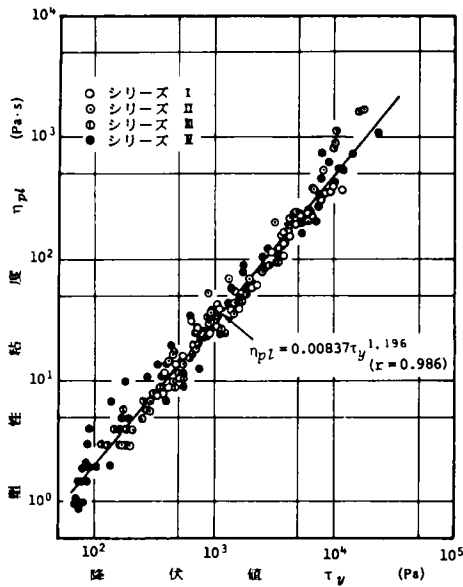


図4.45 フレッシュモルタルの降伏値と塑性粘度との関係

値と塑性粘度の増加傾向は、ほぼ同様と考えられる。

そこで、各配合の降伏値と塑性粘度との関係をプロットすると、図4.45のようになる。実験シリーズ別に異なった記号で示しているように実験シリーズによってその関係は、若干異なっているがほとんど同じである。降伏値  $\tau_y$  (Pa) と塑性粘度  $\eta_{pl}$  (Pa·s) との関係式は、

$$\eta_{pl} = 0.00837\tau_y^{1.196} \quad (4.27)$$

(相関係数  $r = 0.986$ )

となり、高い相関で求まっている。

本実験の結果では、Tattersall<sup>(41)</sup>が報告しているように降伏値と塑性粘度とが独立に変化せず、1つの高い相関関係で表せるのは、本実験のモルタルが混和剤等を用いないプレーンモルタルであることがその理由の1つと考えられる。

したがって、プレーンモルタルで一般に使用される配合の場合には、その降伏値と塑性粘度とは密接な関係があり、同じ降伏値のモルタルでは塑性粘度もほぼ同じ値となり、降伏値は小さいが塑性粘度は大きいといったようなモルタルは存在せず、フレッシュモルタルのレオロジー的性質は、1つの指標で表せることになる。

#### (9) スランプ値、フロー値およびVB値とレオロジー定数との関係

第3章で述べたようにフレッシュモルタルなどのレオロジー定数を測定するのは、装置も大型でその測定方法も複雑であって現場向きでない。しかし、モルタルの性質は施工現場で知る必要があり、このレオロジー的性質そのものでなくてもレオロジー定数に密接な関係がある数値を簡単に求められることは有用である。

その1つの方法として、従来コンシステンシー試験として用いられているスランプ試験、フロー試験およびVB試験によって得られた値とレオロジー

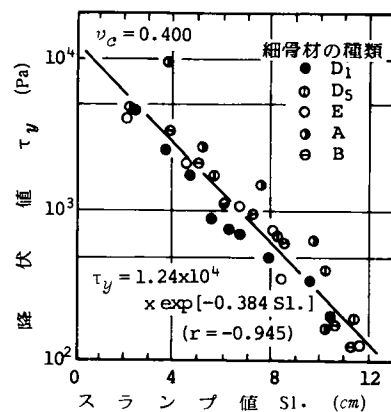


図4.46 スランプ値と降伏値との関係 (シリーズII)

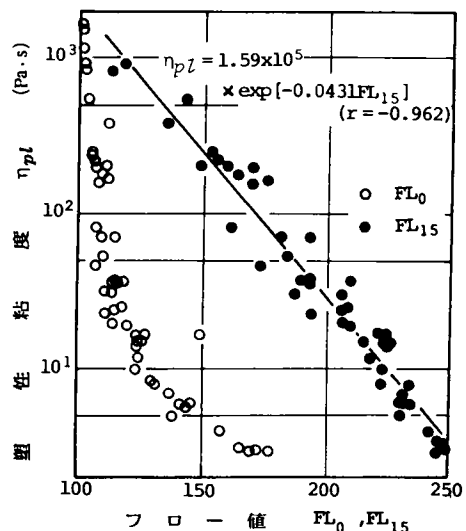


図4.47 フロー値と塑性粘度との関係 (シリーズIII)

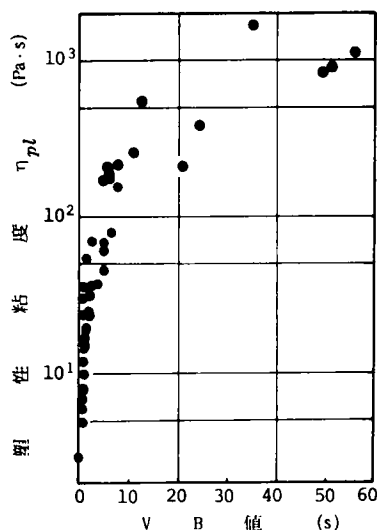


図4.48 VB値と塑性粘度との関係（シリーズⅢ）

定数との間に相関関係があれば、これらの値がレオロジー定数の指標として利用できる。

そこで、4.3.2(5)で述べたようにモルタル用に試作した $\frac{1}{2}$ 縮尺のスランブ試験装置・VB試験装置およびJIS R5201に規定されているフロー試験装置を用いて求めたこれらの測定値とレオロジー定数との関係の1例を図4.46～図4.48に示す。

スランブ値と降伏値との関係は、図4.46に示されているように比較的高い相関関係がある。本項(8)で述べたように降伏値と塑性粘度とは高い相関関係があるので、スランブ値と塑性粘度とも比較的高い相関があることになる。

フロー値と塑性粘度との関係は、図4.47に見られるように、普通のフロー値 $FL_{15}$ と塑性粘度との間には線形関係があるが、フローコーンを取り除いた直後の静定フロー値 $FL_0$ とは相関関係はあるものの線形関係ではない。この傾向は、降伏値の場合も同様である。

また、モルタル用VB値とレオロジー定数との関係は、1例を図4.48に示すように、スランブ値やフロー値に比べて相関関係は低くなっているものの、VB値が大きくなるとレオロジー定数は大となっている。しかし、線形関係ではなく、レオロジー定数の指標としては不適切である。

したがって、フレッシュモルタルのレオロジー定数とスランブ値およびフロー値とは、高い相関関係

があり、レオロジー定数の対数とは線形関係になり、それぞれ次式を得ており、スランブ値およびフロー値を測定すればそのレオロジー定数がある程度推定できることになる。

$$\tau_y = 7.46 \times 10^3 \exp[-0.337SL] \quad (4.28)$$

$$(r = -0.995)$$

$$\eta_{pl} = 2.93 \times 10^2 \exp[-0.382SL] \quad (4.29)$$

$$(r = -0.971)$$

$$\tau_y = 6.23 \times 10^5 \exp[-0.0326FL_{15}] \quad (4.30)$$

$$(r = -0.956)$$

$$\eta_{pl} = 1.59 \times 10^5 \exp[-0.0431FL_{15}] \quad (4.31)$$

$$(r = -0.962)$$

ここで、 $\tau_y$ ；降伏値(Pa)， $\eta_{pl}$ ；塑性粘度(Pa·s)，  
SL； $\frac{1}{2}$ スケールのスランブ値(cm)，  
 $FL_{15}$ ；JIS R5201によるフロー値，  
r；相関係数。

#### 4.3.4 まとめ

以上述べてきたように、ビンガム物体と仮定したフレッシュモルタルのレオロジー定数には、その配合要因および細骨材の粒度など構成材料の特性が影響する。

これらの影響要因を含めた一般的な配合でのフレッシュモルタルのレオロジー構成式として、細骨材の粒度および量がレオロジー定数に及ぼすパラメータとして、モルタル中で細骨材に付着して細骨材と一体となって挙動するとした厚さ $10\mu\text{m}$ の付着ペーストを考え、これと細骨材との体積濃度とを加えたみかけの細骨材濃度とレオロジー定数との間には、セメントペーストの性質ごとに細骨材の粒度および量を変化させてもそれぞれ高い相関関係がある。

この相関関係式の各係数とセメントペーストの性質を支配するセメント体積濃度との間には、それぞれ相関があり、フレッシュモルタルのレオロジー構成式として次式が求められた。

$$\tau_y = 5.49 \times 10^{-18} \exp[(85.2 - 101v_{se})v_c + 61.9v_{se}] \quad (4.25)$$

$$\eta_{pl} = 9.84 \times 10^{-23} \exp[(98.9 - 115v_{se})v_c + 71.1v_{se}] \quad (4.26)$$

ここで、 $\tau_y$ ：降伏値(Pa)， $\eta_{pl}$ ：塑性粘度(Pa・s)，  
 $v_c$ ：セメント体積濃度( $=\frac{c}{w+c}$ )，  
 $v_{se}$ ：みかけの細骨材体積濃度( $=v_s+v_s S_s t$ )，ただし、 $v_s$ ：細骨材体積濃度= $\frac{s}{w+c+s}$ ， $t$ ：細骨材の付着ペースト厚さ=10 $\mu$ m， $S_s$ ：絶対体積1 $\text{m}^3$ の細骨材の比表面積( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )。

なお、以上で得られたフレッシュモルタルのレオロジー構成式は、回転粘度計を用いた他の研究者<sup>(4-13,22)</sup>の報告したものと細骨材量の変化に対する増加量が10倍程度異なっているが、測定装置が相違しており、この影響も考えられるので、これについては今後検討する必要がある。また、式(4.25)および式(4.26)は、本研究で用いた測定装置では、ベースとなるペーストのレオロジー定数を測定することができず相対レオロジー定数として整理できなかったが、基本的には、同型式でレオロジー構成式が求まると考えられる。

また、プレーンのフレッシュモルタルの降伏値と塑性粘度との間には、式(4.27)で表されるように高い相関関係があり、どちらか一方の値が求まればもう一方の値はある程度推定できる。さらに従来コンシステンシーを測定するのに用いられているフロー値や本研究で試作した縮尺 $\frac{1}{2}$ のスランプコーンを用いたスランプ値とレオロジー定数との間には、それぞれ高い相関があり、これらの値でもって、フレッシュモルタルのレオロジー定数を推定することができる。モルタル用のコンシステンシー試験方法として、縮尺 $\frac{1}{2}$ スランプ試験は有効と考えられる。

## 4.4 フレッシュコンクリートのレオロジー構成式の検討

### 4.4.1 まえがき

フレッシュコンクリートのレオロジー構成式を検討するためには、コンクリートを2相材料と考えることは有力な方法である。コンクリートを2相材料とするととき何を連続相とし、何を分散相と考えるかは、表4.2で示したようにいくつかのケースがある。

ここでは、従来からのモルタルとコンクリートとを区別する慣例、モルタルやコンクリートの流動するときの状態を観察するとモルタルとコンクリート

とは異なる挙動をしていると感じられること、その構成材料の寸法差などを考慮して、まずフレッシュコンクリートをモルタルと粗骨材とから成る2相材料と考えて検討することにする。

フレッシュコンクリートのレオロジー構成式について、角田らは<sup>(4-13)</sup>モルタルの場合と同様に森・乙竹式を用いて検討し、次式を得ているが、相対粘度に関してだけであり、粗骨材の粒度や粒形、セメントペーストの性質が一定の場合のみであって、これらの影響に関する検討が残されている。

$$\eta_r = \frac{\eta_c}{\eta_o} = 1 + \frac{3}{\left(\frac{1}{v_{solid}} - \frac{1}{v_{solidc}}\right)} \quad (4.32)$$

ここで、 $\eta_r$ はフレッシュコンクリートの相対粘度、 $\eta_o$ はペーストあるいはモルタルの塑性粘度、 $\eta_c$ はフレッシュコンクリートの塑性粘度、 $v_{solid}$ は粗骨材あるいは骨材の体積濃度、 $v_{solidc}$ は0.52～0.67の範囲の定数

である。

そこで、本節では、粗骨材の粒度、粒形、セメントペーストの性質すなわちセメント体積濃度、モルタルの性質すなわちセメント体積濃度および細骨材体積濃度を変化させ、ビンガム物体と仮定したフレッシュコンクリートのレオロジー定数を平行板プラストメータで求め、これら配合要因および粗骨材の特性をパラメータとしたフレッシュコンクリートのレオロジー構成式を実験的に検討する。また、レオロジー定数相互の関係についても考察する。

### 4.4.2 実験計画および実験の方法

#### (1) 実験計画

4.4.1で述べたようにフレッシュコンクリートをモルタルと粗骨材から成る2相材料と考えた場合、この2相材料の性質に及ぼす要因としては、連続相であるモルタルの性質、分散相である粗骨材の特性およびこれらの相の割合がある。

モルタルの性質については、前節で詳しく検討し、そのレオロジー構成式を求めた。本節では、主として分散相である粗骨材の特性すなわち粒度、粒形および各相の混合割合がビンガム物体と仮定したフレ

表4.15 コンクリートに関する実験計画

実験シリーズ	セメント体積濃度 $v_c$	細骨材体積濃度 $v_s$	粗骨材体積濃度 $v_g$	粗骨材の種類
I	0.40, 0.42, 0.45 (3種)	0.50 (1種)	0.0 ~ 0.40 (10種)	砕石5~10mm, 砕石5~15mm, 砕石 10~15mm, 川砂利5~15mm (4種)
II	0.40 (1種)	0.50 (1種)	0.0 ~ 0.40 (7種)	砕石5~15mm : 川砂利5~15mm = 0~100% (6種)
III	0.38, 0.40, 0.42 (3種)	0.45 ~ 0.55 (3種)	0.0 ~ 0.40 (5種)	砕石5~15mm, 12.6mmおよび 16.8mmのガラス玉 (3種)
IV	0.38, 0.40, 0.42 (3種)	0.45 ~ 0.55 (3種)	0.0 ~ 0.40 (7種)	砕石5~15mm, 12.6mmおよび 16.8mmのガラス玉 (3種)

フレッシュコンクリートのレオロジー一定数に及ぼす影響ならびにモルタルの性質と粗骨材の特性とのレオロジー一定数に及ぼす相互作用について実験的に調べ、フレッシュコンクリートのレオロジー構成式を検討するため、次の4つの実験シリーズを計画した。

シリーズI；粗骨材の粒度、粒形およびその量がフレッシュコンクリートのレオロジー一定数に及ぼす影響およびセメント体積濃度を变化させたモルタルの性質の違いの影響の全般的傾向を調べるもの

シリーズII；粗骨材の粒形の影響を調べるもの

シリーズIII, IV；モルタルの性質すなわちセメント体積濃度および細骨材体積濃度がフレッシュコンクリートのレオロジー一定数に及ぼす影響を調べるもの

シリーズIV；モルタルの性質および粗骨材の体積濃度を変え、これらの要因とレオロジー一定数との関係式を検討するもの  
これらの実験計画をまとめて表4.15に示す。

フレッシュコンクリートのレオロジー一定数として

は、降伏値および塑性粘度とし、平行板プラストメータを用いて求めた。

コンシステンシー試験としては、スランブ試験および一部ではVB試験を行った。

コンクリート温度は、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ になるようにし、同一配合に対する測定は、日を変えて2回行い、その平均を測定値とした。

## (2) 使用材料

セメントは、同一工場製の普通ポルトランドセメントを使用した。それらの物理試験成績を表4.16に示す。

細骨材は、表4.17および図4.49に示す徳島県吉野

表4.16 使用セメントの性質

実験シリーズ	比重	比表面積 (ブレン法) ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	フロー値
I	3.16	3120	250
II	3.16	3080	244
III	3.15	3120	255
IV	3.17	3110	253

表4.17 使用細骨材の性質

細骨材の種類	実験シリーズ	比重	吸水率 (%)	粗粒率 (F.M.)
a	I	2.62	1.50	2.76
b	II	2.63	1.32	2.63
c	III	2.62	1.76	3.22
d	IV	2.64	1.40	2.90

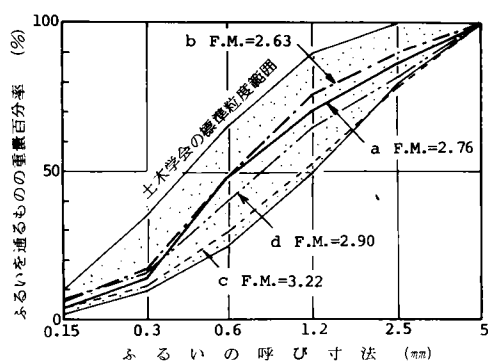


図4.49 使用細骨材の粒度曲線

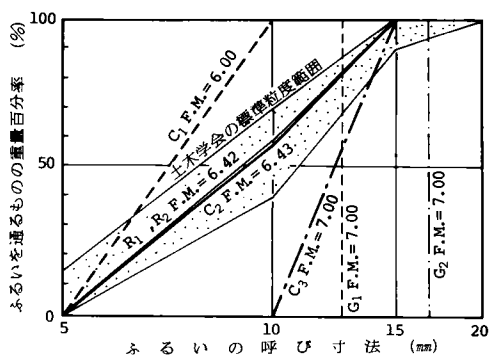


図4.50 使用粗骨材の粒度曲線

表4.18 使用粗骨材の各種性質

粗骨材の種類	実験シリーズ	比重	吸水率 (%)	単位容積重量 (kg/m³)	実積率 (%)	粗粒率 (F.M.)	備考
R <sub>1</sub>	I	2.68	1.16	1 630	60.9	6.42	川 砂 利
R <sub>2</sub>	II	2.61	1.30	1 580	61.3	6.42	川 砂 利
C <sub>1</sub>	I, II, III, IV	2.61	1.70	1 420	54.6	6.00	砕石 5～10mm
C <sub>2</sub>				1 480	56.6	6.43	砕石 5～15mm
C <sub>3</sub>				1 480	56.6	7.00	砕石 10～15mm
G <sub>1</sub>	III, IV	2.48	0	1 520 *	61.3 *	7.00	ガラス玉 12.6mm
G <sub>2</sub>		2.50		1 510 *	60.4 *	7.00	ガラス玉 16.8mm

注) \* 印はジッキング法による。

川水系の陸砂を用いた。使用に当っては、表面乾燥飽水状態に近い空气中乾燥状態にして約 1㎡の骨材ビンに貯蔵し、使用する直前に含水率を測定して有効吸水量を補正して用いた。

粗骨材は、表4.18に示す 6 種のものを使用した。徳島県吉野川水系産陸砂利の粗骨材 R<sub>1</sub> および R<sub>2</sub> は、5、10および15mmふるいでふるい分け、質量比で 5～10mm：10～15mmを 6：4 に再混合し最大寸法 15mm，粗粒率 6.42として用いた。

粗骨材 C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub> および C<sub>3</sub> は、徳島県大麻町産の硬質砂岩砕石の 5～13mm，13～20mmを 5，10および15mmのふるいでふるい分け，5～10mm，10～13mmおよび13～15mmの粒群にし，C<sub>1</sub> は 5～10mmのもので粗粒率 6.00，C<sub>2</sub> は 5～10mm：10～13mm：13～15mmを質量比で 6：2：2 に混合した最大寸法 15mm，粗粒率 6.43 のもの，C<sub>3</sub> は 10～13mmと 13～15mmを質量比で 5：5 に再混合した粗粒率 7.00のものとして使用した。

なお、粗骨材はいずれも表面乾燥飽水状態にして用いた。

また、形状および表面積が既知のモデル粗骨材として、径12.6mm，比重2.48のガラス玉 G<sub>1</sub> および径 16.8mm，比重2.50のガラス玉 G<sub>2</sub> を用いた。粗粒率は G<sub>1</sub>、G<sub>2</sub> とも 7.00で、乾燥状態で使用した。

これら粗骨材の粒度曲線は、図4.50に示す。

### (3) コンクリートの配合

コンクリートの配合は、本項(1)で述べたようにコンクリートをモルタルと粗骨材とから成る 2 相材料と考えたため、モルタルの品質を変えるためにセメントペースト中のセメント体積濃度  $v_c (= \frac{c}{w+c})$  すなわち水セメント比 W/C およびモルタル中の細骨材の体積濃度  $v_s (= \frac{s}{w+c+s})$  を使用し、粗骨材量は、コンクリート中の粗骨材の体積濃度  $v_g (= \frac{g}{w+c+s+g})$  を用いて表した。なお、空気量については、プレーンコンクリートで

あるので無視した。

測定した配合は、コンクリートのレオロジー的性質に及ぼす影響を調べるシリーズⅠに用いた広く変化させたものおよびレオロジー構成式を検討するために用いた一般的な水セメント比および細骨材率に

表4.19 シリーズⅠのコンクリートの配合  
(使用粗骨材; R<sub>1</sub>, C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>)

$\nu_g$ (s/a %)	$\nu_c$ (W/C)	0.50		
		0.40 (0.48)	0.42 (0.44)	0.45 (0.39)
0.00 (100)	—	○	○	○
0.15 (74)	砕石 5~10mm 砕石 5~15mm 砕石 10~15mm 川砂利 5~15mm	○ ○ ○ ○	○	○ ○ ○ ○
0.20 (67)	砕石 5~10mm 砕石 5~15mm 砕石 10~15mm 川砂利 5~15mm	○ ○ ○ ○	○	○ ○ ○ ○
0.25 (60)	砕石 5~10mm 砕石 5~15mm 砕石 10~15mm 川砂利 5~15mm	○ ○ ○ ○	○	○ ○ ○ ○
0.27 (57)	砕石 5~10mm 砕石 5~15mm 砕石 10~15mm 川砂利 5~15mm	○ ○ ○ ○	○	○ ○ ○ ○
0.29 (55)	砕石 5~10mm 砕石 5~15mm 砕石 10~15mm 川砂利 5~15mm	○ ○ ○ ○	○	○ ○ ○ ○
0.31 (53)	砕石 5~10mm 砕石 5~15mm 砕石 10~15mm 川砂利 5~15mm	○ ○ ○ ○	○	○ ○ ○ ○
0.33 (50)	砕石 5~10mm 砕石 5~15mm 砕石 10~15mm 川砂利 5~15mm	○ ○ ○ ○	○	○ ○ ○ ○
0.35 (48)	砕石 5~10mm 砕石 5~15mm 砕石 10~15mm 川砂利 5~15mm	○ ○ ○ ○		○
0.40 (43)	砕石 5~10mm 砕石 5~15mm 砕石 10~15mm 川砂利 5~15mm	○ ○ ○ ○		

注) ○印は測定した配合を示す。

なるようなシリーズⅡ~Ⅳのものとした。各シリーズの配合は、表4.19~表4.22に示す。

シリーズⅠでは、表4.19に示すようにモルタルの性質を細骨材体積濃度  $\nu_s$  一定でセメント体積濃度  $\nu_c$  を変えて3種類とし、粗骨材の種類は4種、粗骨材量  $\nu_g$  を10段階に変えた。測定した組合せは、若干の測定誤差を含む場合もあるが平行板ブラストメータでレオロジー定数が測定できるスランプ値が1.0cm~18.0cmのものとし、参考のため21cmまでの配合も測定した。

シリーズⅡでは、モルタルの性質を一定とし、粗骨材の割合およびその同一割合で粗骨材の粒形を変化させるため、川砂利 R<sub>2</sub> と碎石 C<sub>2</sub> の混合割合を表4.20のように6種に変えた。

シリーズⅢおよびⅣでは、モルタルの性質を表4.21および表4.22に示すようにセメント体積濃度  $\nu_c$  3種、細骨材体積濃度  $\nu_s$  を3種とした計9種に変

表4.20 シリーズⅡのコンクリートの配合  
(使用粗骨材; R<sub>2</sub>+C<sub>2</sub>; 5~15mm)

$\nu_g$ (s/a %)	$\nu_c$ (W/C)	0.50					
		0.40 (0.48)					
		100	80	60	40	20	0
0.00 (100)	○	○	○	○	○	○	○
0.15 (74)	○	○	○	○	○	○	○
0.20 (67)	○	○	○	○	○	○	○
0.25 (60)	○	○	○	○	○	○	○
0.30 (54)	○	○	○	○	○	○	○
0.35 (48)	○	○	○	○	○	○	○
0.40 (43)	○	○	○	○	○	○	○

注) ○印は測定した配合を示す。

表4.21 シリーズⅢのコンクリート配合 (使用粗骨材; C<sub>2</sub>, 5~15mm)

$\nu_g$	$\nu_c$ (W/C)	0.45			0.50			0.55		
		0.38 (0.52)	0.40 (0.48)	0.42 (0.44)	0.38 (0.52)	0.40 (0.48)	0.42 (0.44)	0.38 (0.52)	0.40 (0.48)	0.42 (0.44)
0.00		○ (100)	○ (100)	○ (100)	○ (100)	○ (100)	○ (100)	○ (100)	○ (100)	○ (100)
0.10			○ (80)	○ (80)	○ (82)	● (82)	○ (82)	○ (83)	○ (83)	○ (83)
0.20			○ (64)	○ (64)	○ (67)	● (67)	○ (67)	○ (69)	○ (69)	○ (69)
0.30		○ (51)	○ (51)	○ (51)	○ (54)	● (54)	○ (54)	○ (56)	○ (56)	○ (56)
0.40		○ (40)	○ (40)	○ (40)	○ (43)	● (43)	○ (43)	○ (45)	○ (45)	○ (45)

注) ○印は測定した配合を示す。ただし、●印はガラス玉 12.6mm および 16.8mm についても測定した。( ) 内は細骨材率 s/a % を示す。



表4.22 シリーズⅣのコンクリートの配合（使用粗骨材；C<sub>2</sub>，5～15mm）

$\frac{v_g}{v_c}$ (W/C)	0.45			0.50			0.55		
	0.38 (0.52)	0.40 (0.48)	0.42 (0.44)	0.38 (0.52)	0.40 (0.48)	0.42 (0.44)	0.38 (0.52)	0.40 (0.48)	0.42 (0.44)
0.00	○(100)	○(100)	○(100)	○(100)	○(100)	○(100)	○(100)	○(100)	○(100)
0.15		○(72)	○(72)		⊙(74)	○(74)	○(76)	○(76)	○(76)
0.20		○(64)	○(64)	○(67)	⊙(67)	○(67)	○(69)	○(69)	○(69)
0.25		○(57)	○(57)	○(60)	⊙(60)	○(60)	○(62)	○(62)	○(62)
0.30	○(51)	○(51)	○(51)	○(54)	⊙(54)	○(54)	○(56)	○(56)	○(56)
0.35	○(46)	○(46)	○(46)	○(48)	⊙(48)	○(48)	○(51)	○(51)	○(51)
0.40	○(40)	○(40)	○(40)	○(43)	⊙(43)	○(43)	○(45)	○(45)	○(45)

注) ○印は測定した配合を示す。ただし、⊙印はガラス玉 12.6mm および 16.8mm についても測定した。( )内は細骨材率  $s/a$  % を示す。

え、細骨材率で100%すなわちモルタルから一般的な配合よりも小さめの40%まで粗骨材体積濃度  $v_g$  を変化させた。なお、一部の配合では、粗骨材としてガラス玉 G<sub>1</sub> および G<sub>2</sub> を使用した。

#### (4) コンクリートの練り混ぜ

コンクリートの練り混ぜは、容量50ℓの強制練りミキサを使用し、細骨材、セメント、粗骨材の順に投入し、ミキサで混合させながら10秒以内で練り混ぜ水を入れ、全材料投入後3分間で練り混ぜた。試料の量は、シリーズⅠ，ⅢおよびⅣでは25ℓ，シリーズⅡでは30ℓとした。ミキサでの練り混ぜ終了後、練り板上に約40秒間で排出し、2往復シャベルで切り返して試料とした。

なお、コンクリート温度の違いによる影響を少なくするため練り混ぜ水の温度を変え、コンクリートの練り上がり温度が20±2℃になるようにした。コンクリート温度は、最高温度50℃のアルコール棒状温度計で練り混ぜ終了後直ちに測定した。

#### (5) スランプ値およびVB値の測定

練り混ぜ終了後直ちに、JIS A1101 に従ってスランプ値を同時に2個測定した。

シリーズⅠでは、振動数3 600rpm、加速度2 gの振動台を用いて BS1881；Part 2 の方法に従ってスランプ値と同時にVB値を測定した。

#### (6) レオロジー一定数の測定

コンクリートのレオロジー一定数すなわち降伏値および塑性粘度は、平行円板の直径60cm、試料高さ約6 cmとした第3章3.4.3で述べた平行板プラストメータⅢ型を用いて測定した。載荷重の大きさは、試

料の最初の変形速度が0.2～0.4mm/sになるように、試料のコンシステンシーによって変えた。測定は、本項(5)のスランプ値の測定後すぐに、第3章3.5で述べた方法に従って行った。

実験室の温度は、20℃付近になるようにし、試料温度が20±2℃から大きくはずれることのないように努めた。また、測定手順は、練り混ぜ、スランプ値の測定を含めて同一とし、注水後約8分でレオロジー一定数の測定を開始した。レオロジー一定数は、第3章3.5で述べた方法と同様にして求めた。

なお、すべての測定は日を変えて2回以上測定し、その平均を測定値とした。

#### (7) 粗骨材の表面積の測定

粗骨材の粒度、粒形および量がフレッシュコンクリートのレオロジー的性質に及ぼす粗骨材の影響を1つのパラメータで表せれば便利である。その1つとして粗骨材の表面積が考えられる。

骨材の表面積を測定する方法は、4.3.2 (7)で述べたようにいくつかの方法があり、粗骨材のように比較的大きな粒子のものには、投影法、被膜法、付着法などが適しているといわれている<sup>4-25)</sup>しかし、いずれの方法も粗骨材の真の表面積を測定するのは非常に困難であり、被膜法や付着法は測定がかなり複雑であり、手数がかかる。そこで、本実験では簡便な方法である投影法<sup>4-25)</sup>を採用した。

投影法は、任意の形状をした単位面積の任意方向の平面への投影面積の平均は、常に $\frac{1}{2}$ であることを利用したものである。立体の場合には両面あるから、凹面を持たないことを前提条件として、任意の立体

の投影面積の平均は、全表面積の $\frac{1}{4}$ であることを用いた。

球のように単純な形状をしていない一般の粗骨材の表面積は、なるべく多くの方向に対する投影面積を取り、これを平均するほど精度がよくなる。しかし、實際上多数の方向の投影面積を求めるのは手数がかかるので、本実験では、各骨材粒子の長軸方向を基準として互いに直交する方向すなわち短軸方向および長軸直角方向の計3方向の投影図を求め、この投影面積の平均の4倍がその粗骨材粒子の表面積であるとした。

測定装置は、図4.51に示すようなもので各粒径の粗骨材から代表試料を50個採取し、ジアゾ感光紙上においた透明なガラス板上に各軸方向になるように接着し、平行光線である太陽光を用いて約10秒間感光させ現像して投影図を求めた。なお、感光面と太陽光線とを垂直にするために、測定板上に垂直に立



図4.51 粗骨材粒子の投影図の測定状況

表4.23 各粗骨材の比表面積

粗 骨 材 の 種 類		比表面積 (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
R <sub>1</sub>	川砂利 5~10mm	985
	川砂利 10~15mm	580
R <sub>2</sub>	川砂利 5~10mm	962
	川砂利 10~15mm	551
C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> , C <sub>3</sub>	砕 石 5~10mm	1038
	砕 石 10~13mm	690
	砕 石 13~15mm	603
G <sub>1</sub>	ガラス玉 12.6mm	478
G <sub>2</sub>	ガラス玉 16.8mm	357

てた棒の影がなくなるようにセットした。また、ガラス板による太陽光線の屈折および感光紙の現像等による伸縮の影響は、面積が既知の紙をガラス板上に貼り、感光紙上のこの面積も同時にプランニメータで求めて補正した。プランニメータによる測定は、各3回行い、その平均を測定値とした。

さらに、投影面積を求める試料は前もって質量を測定し、それぞれの比重を用いて絶対体積を求めておいた。

このようにして測定した粗骨材粒子の表面積と絶対体積とから表4.23に示す比表面積を求めた。

#### (8) 粗骨材の付着モルタル量の測定

4.3.3 (6)で述べたモルタル中の細骨材粒子に付着して細骨材と一体となって挙動するセメントペーストと同じように、コンクリート中で粗骨材粒子に付着し粗骨材粒子と一体となって挙動するモルタルを考えることができる。この付着モルタルは、粗骨材に十分付着していると考えられるので次のようにして求めた。

##### (i) 測定装置

粗骨材に付着して粗骨材と一体となって挙動しないモルタル分を除くためには振動を利用した。振動数3600rpm、加速度2gのVB試験用振動台に、図4.52 (1)に見られるように円筒容器を取り付け、この円筒容器に5mmの標準網ふるいを固定した装置を使用した。

##### (ii) 測定方法

各配合のコンクリートのモルタル分と同じ配合のモルタルを4.3.2で述べたモルタルミキサを用いて同じ手順で練り混ぜ、所定量の表面乾燥飽水状態の粗骨材を練り上がったモルタルに加えて、手練りで約2分間練り混ぜ、シリーズIおよびIIでは3ℓ、シリーズIIIでは2ℓのコンクリート試料を作成した。

これを前述した装置の網ふるいの上に図4.52 (2)に示すように、予備実験の結果からモルタルが十分網目を通して落下できる量と思われる練りさじ2杯分を入れ、振動をかけて付着していないモルタル分を除いた。振動時間は、予備実験を行いモルタル分がほとんど落下しなくなるシリーズIおよびIIでは20秒、シリーズIIIでは碎石で40秒、ガラス玉で20秒とした。この操作を繰返し、各試料について5mm標準網ふるいに残留した試料の質量を測定した。5mmふるいに残留した試料の1例を図4.52 (3)~(6)に示



(1)



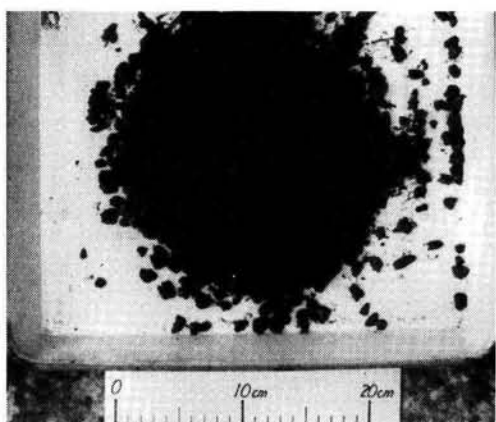
(2)



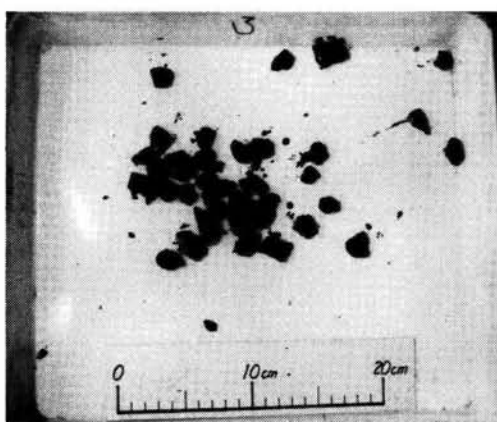
(3)



(4)



(5)



(6)

図4.52 粗骨材の付着モルタル量の測定状況

表4.24 粗骨材の付着モルタル量および平均付着厚さ  
(シリーズI, II)

粗骨材の種類	実験シリーズ	
	I	II
	$v_g$	$v_c$
	0.50	0.40
砕石 5~10mm	0.903 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> (0.87 mm)	0.891 (0.86)
砕石 10~13mm	0.564 (0.82)	0.557 (0.81)
砕石 13~15mm	0.464 (0.77)	0.458 (0.76)
砕石 5~15mm *	0.747 (0.85)	0.738 (0.84)
川砂利 5~10mm	0.744 (0.76)	0.720 (0.75)
川砂利 10~15mm	0.368 (0.63)	0.351 (0.64)
川砂利 5~15mm **	0.594 (0.72)	0.558 (0.70)

注) \* 印は5~10:10~13:13~15 = 6:2:2, \*\* 印は5~10:10~15 = 6:4 とした計算値である。  
( ) 内は平均付着厚さ (mm) を示す。

表4.25 砕石の付着モルタル量の実測値と計算値との比較  
(シリーズIII)

粗骨材の粒径 (mm)	$v_g$	0.50			
	$v_c$	0.40			
	$v_g$	0.10	0.20	0.30	0.40
5 ~ 10		0.406	0.390	0.379	0.415
10 ~ 15		0.330	0.273	0.250	0.255
5 ~ 15		0.385	0.362	0.341	0.360
5 ~ 15 *		0.376	0.343	0.327	0.351

注) \* 印は5~10mm:10~15mm = 6:4 とした計算値である。

表4.27 ガラス玉の付着モルタル量および平均付着厚さ  
(シリーズIII)

粗骨材の粒径 (mm)	12.6 mm			16.8 mm		
	$v_g$	$v_c$	$v_g$	$v_c$	$v_g$	$v_c$
	0.38	0.40	0.42	0.38	0.40	0.42
0.10	0.070 (0.15)	0.080 (0.17)	0.086 (0.18)	0.055 (0.15)	0.062 (0.17)	0.079 (0.22)
0.20	0.066 (0.14)	0.076 (0.16)	0.085 (0.18)	0.052 (0.15)	0.059 (0.17)	0.078 (0.22)
0.30	0.063 (0.13)	0.075 (0.16)	0.086 (0.18)	0.050 (0.14)	0.060 (0.17)	0.077 (0.22)
0.40	0.062 (0.13)	0.076 (0.16)	0.085 (0.18)	0.053 (0.15)	0.060 (0.17)	0.077 (0.22)

注) ( ) 内は平均付着厚さ (mm) を示す。

表4.26 粗骨材の付着モルタル量および平均付着厚さ (シリーズIII)

<div><div><div><math>v_g</math></div><div><math>v_g</math></div><div><math>v_c</math></div></div></div>	0.45			0.50			0.55		
	0.38	0.40	0.42	0.38	0.40	0.42	0.38	0.40	0.42
0.10	<div><div><div><math>\text{m}^3/\text{m}^3</math></div><div>0.192</div><div><math>\text{mm}</math></div></div><div>(0.22)</div></div>	0.232 (0.26)	0.278 (0.32)	0.282 (0.32)	0.385 (0.44)	0.486 (0.55)	0.409 (0.46)	0.507 (0.58)	0.687 (0.78)
0.20	0.180 (0.20)	0.218 (0.25)	0.257 (0.29)	0.273 (0.31)	0.362 (0.41)	0.423 (0.48)	0.381 (0.43)	0.485 (0.55)	0.584 (0.66)
0.30	0.177 (0.20)	0.207 (0.23)	0.239 (0.27)	0.248 (0.28)	0.341 (0.39)	0.423 (0.48)	0.318 (0.36)	0.440 (0.50)	0.529 (0.60)
0.40	0.184 (0.21)	0.220 (0.25)	0.254 (0.29)	0.267 (0.30)	0.360 (0.41)	0.473 (0.54)	0.383 (0.43)	0.493 (0.56)	0.647 (0.73)

注) ( ) 内は平均付着厚さ (mm) を示す。

す。

シリーズIおよびIIでは、粗骨材体積濃度が異なってもモルタルの性質が同じ場合には、付着モルタル量は大きく変化しないと仮定し、粗骨材体積濃度  $v_g$  は0.25のみの場合について測定した。モルタル

は、シリーズIでは、細骨材体積濃度  $v_s = 0.50$  でセメント体積濃度  $v_c = 0.40, 0.42$  および0.45の3種、シリーズIIでは、細骨材体積濃度  $v_s = 0.50$ 、セメント体積濃度  $v_c = 0.40$  とし、それぞれの粗骨材についてモルタルが付着した質量を測定した。

シリーズIIIでは、配合要因によって付着モルタル量も変化すると考えられるので、すべての配合について付着モルタル量の測定を行った。なお、シリーズIIIで振動時間を長くしたのは、シリーズIおよびIIの実験では付着していないモルタル分が検討の結果残留しているとも考えられたためである。

測定個数は、同一条件に対してシリーズIおよびIIでは6個、シリーズIIIでは2個とした。

なお、モルタルの練り上がり時にフロー試験を行い、計量ミス等のチェックを行った。コンクリートの練り上がり温度は、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の範囲に入るようにした。

#### (iii) 付着モルタル量の計算

(ii)で求めたモルタル分の付着した粗骨材の質量からあらかじめ測定しておいた表面乾燥飽水状態の粗骨材の質量を差し引いて付着モルタル質量を求めた。これをモルタルの理論単位容積質量で除し、粗骨材の絶対体積  $1\text{ m}^3$  当りの付着モルタル量を計算した。

この計算結果を表4.24～表4.27に示す。

### 4.4.3 実験結果およびその考察

#### (1) はじめに

本節における実験結果においても、コンクリートの練り上がり温度は、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の範囲にほとんどのものがあり、練り混ぜてからレオロジー定数測定まで同一の手順とし、注水後約8分ですべての測定を終了した。したがって、考察においては、温度や経過時間による影響は無視する。

#### (2) コンクリートの配合要因とレオロジー定数との関係

コンクリートのレオロジー定数に影響する配合要因としては多くのものが考えられるが、モルタルの性質、粗骨材の量、粒度、粒形などはその主なものである。ここでは、モルタルの性質を細骨材体積濃度すなわち細骨材量は一定としセメント体積濃度すなわち水セメント比で3種に変え、粗骨材の量、粒度、粒形を変化させた配合を対象とし、これらの要因がレオロジー定数に及ぼす影響の全般的傾向を調べる。

粗骨材の粒度一定で粗骨材の量、粒形およびセメント体積濃度を変化させた場合のレオロジー定数を図4.53および図4.54に示す。また、2相材料の塑性

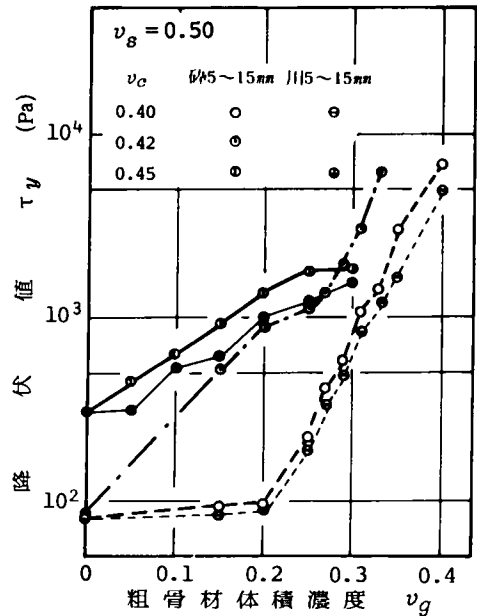


図4.53 粗骨材体積濃度と降伏値との関係（シリーズI）

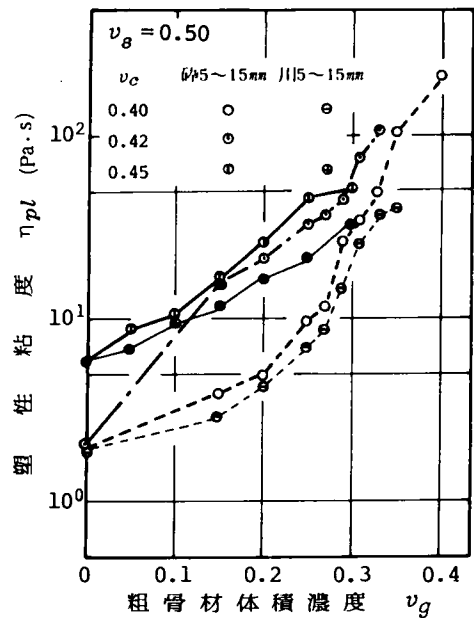


図4.54 粗骨材体積濃度と塑性粘度との関係（シリーズI）

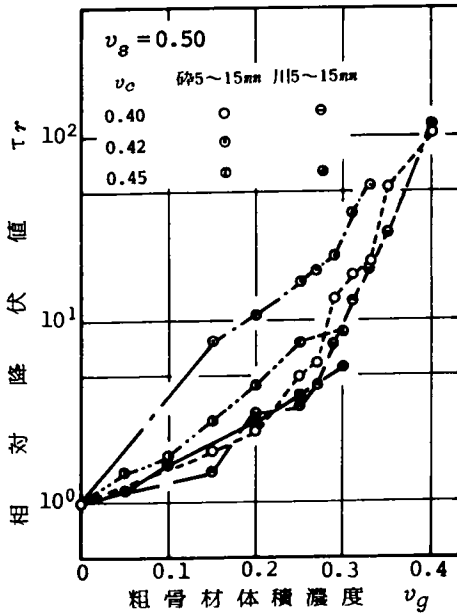


図4.55 粗骨材体積濃度と相対降伏値との関係 (シリーズI)

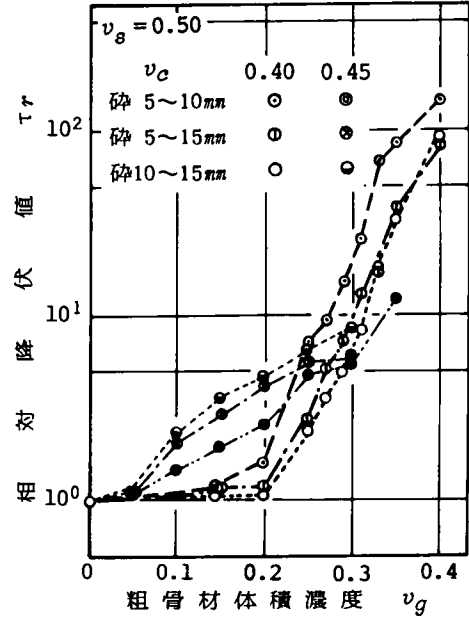


図4.57 粗骨材体積濃度と相対降伏値との関係 (シリーズI)

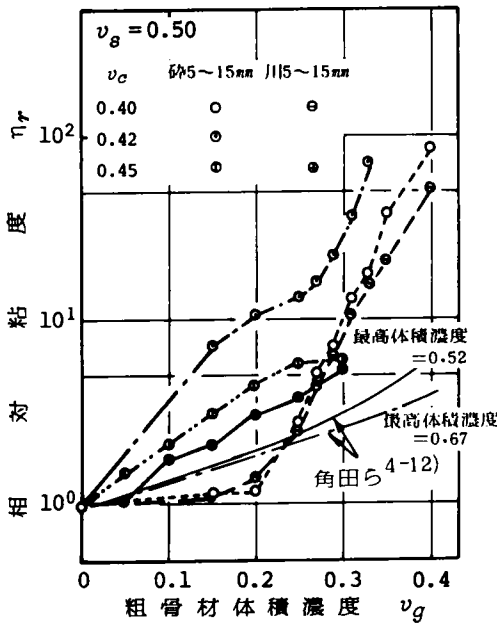


図4.56 粗骨材体積濃度と相対粘度との関係 (シリーズI)

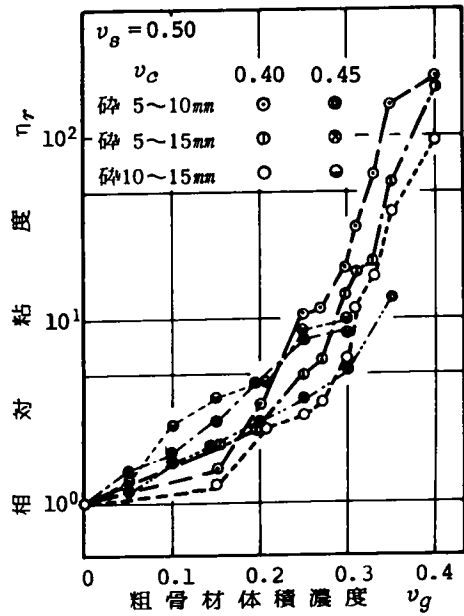


図4.58 粗骨材体積濃度と相対粘度との関係 (シリーズI)

粘度の表示によく使用される連続相の塑性粘度で除した相対粘度および降伏値にもこの概念を適用し、連続相すなわちモルタルの降伏値および塑性粘度でコンクリートのレオロジー定数をそれぞれ除した相対降伏値  $\tau_r$  および相対粘度  $\eta_r$  で同じ結果を図4.55および図4.56に示す。

粗骨材の粒形およびマトリックスの性質を一定にして粗骨材の粒度を変えた場合の相対レオロジー定数を図4.57および図4.58に示す。

図4.53～図4.57に見られるように、いずれの場合も粗骨材体積濃度すなわち粗骨材量が増加するとレオロジー定数は大きくなっている。降伏値と塑性粘度の増加の傾向はほとんど同じであるが、粗骨材体積濃度が0.2以下の範囲では、粗骨材量の増加に対する降伏値の増加が塑性粘度に比べて、セメント体積濃度が小さいすなわちモルタルのコンシステンシーが大きい場合においてわずかではあるが小となっている。

粗骨材の量、粒度、粒形などが一定の場合には、図4.53および図4.54に示されているように、セメント体積濃度が高くなるに従ってレオロジー定数は増加している。その増加の割合は、セメント体積濃度の大きさによって若干異なり、セメント体積濃度が0.42および0.45と大きい場合には、粗骨材量に対するレオロジー定数の増加は、セメント体積濃度が小さい0.40の場合より小となっている。

モルタルの性質、粗骨材の量および粒度が一定で粗骨材の粒形が碎石と川砂利というように異なる場合には、図4.53～図4.56に示されているように粒形の違いによってレオロジー定数は異なり、川砂利のように粒形の丸い方がレオロジー定数は小となっている。

また、モルタルの性質、粗骨材の粒形や量が同じで粒度が変化するときには、図4.57および図4.58に見られるように粒度の違いによってレオロジー定数は異なり、粒度の粗い方がレオロジー定数は小さい。

一方、モルタルのレオロジー定数で除した相対レオロジー定数も図4.53および図4.54のレオロジー定数そのものの値の場合と同様に、図4.55～図4.58に示されているようにモルタルの性質や粗骨材の量、粒度、粒形などが変化すると異なっている。

以上述べてきたように連続相すなわちモルタルの性質や粗骨材の量、粒度、粒形などの要因のうちど

れか1つでも変化するとレオロジー定数は異なり、その大小は、従来コンシステンシーの大小として知られているものと同じ傾向を示している。また、コンクリートのベースとなるモルタルのレオロジー定数でそれぞれの配合のレオロジー定数を除した相対レオロジー定数もこれらの配合要因や粗骨材の特性によって変化している。

したがって、フレッシュコンクリートのレオロジー定数をその配合要因や骨材の特性をパラメータとしてコンクリートのレオロジー構成式を求めるためには、モルタルの性質をベースにするとしても、モルタルの性質と粗骨材の特性とがコンクリートのレオロジー定数に及ぼす影響を表すパラメータを検討する必要がある。

なお、回転粘度計を用いた角田ら<sup>4-13)</sup>によるフレッシュコンクリートの相対降伏値は、モルタルの性質によって異なっているが、粗骨材体積濃度0.4で1.3～4となっており、図4.55および図4.57に示す本実験の結果の1/10以下と大きく相違している。相対粘度は、図4.56に示すように、粗骨材の体積濃度の高いところでは、降伏値の場合と同様に約1/10となっている。このように大きく結果が異なっているのは、角田らの結果<sup>4-13)</sup>が、外円筒  $\phi 36 \times 24\text{cm}$  で円筒間隔8cmの内円筒回転粘度計を用いて、円筒面と試料との間にすべりは無いものとして求めたものであるなど測定装置が異なることが主な原因と思われる。この点については、今後詳しく検討する必要がある。

### (3) 粗骨材粒形とレオロジー定数との関係

(2)で述べたように、モルタルの性質、粗骨材の粒度および量が同じでも粗骨材の粒形が異なれば、フレッシュコンクリートのレオロジー定数は相違していることが示されている。そこで、ここでは粗骨材の粒形の違いが、コンクリートのレオロジー定数に及ぼす影響を定量的に表すパラメータについて実験的に検討する。

粒形の異なる川砂利  $R_2$  と碎石  $C_2$  の混合割合を変えて製造した5～15mmの粒度一定で、粒形を変化させた粗骨材を用いて、モルタルの性質を一定にし粗骨材量を変えた場合の相対レオロジー定数を図4.59および図4.60に示す。これらの図に見られるように粗骨材の量および粒度が同じであっても粒形の違いによってレオロジー定数は異なり、碎石の混入率が小さくなるすなわち粗骨材全体の粒形がまるくな

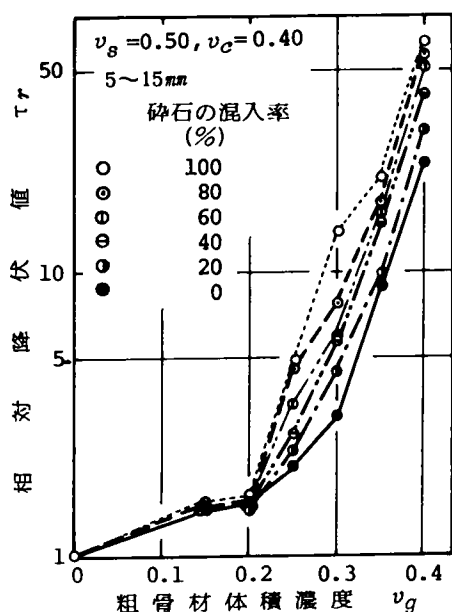


図4.59 粒形が異なる場合の粗骨材体積濃度と相対降伏値との関係 (シリーズII)

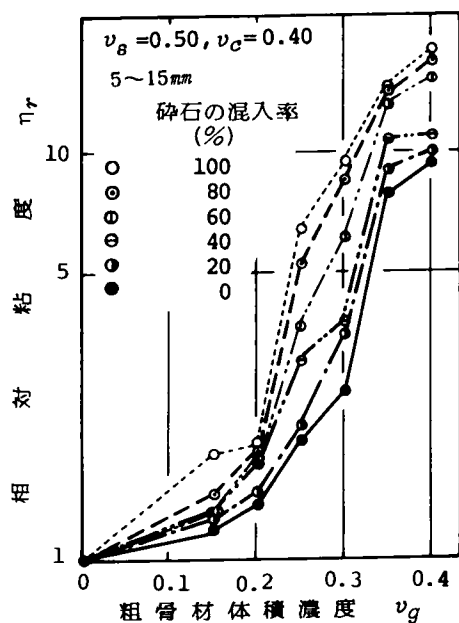


図4.60 粒形が異なる場合の粗骨材体積濃度と相対粘度との関係 (シリーズII)

るに従って相対レオロジー定数は小さくなっている。また、モルタルや粗骨材の性質がともに一定ならば、粗骨材の量が増加すると相対レオロジー定数は増大している。

したがって、粗骨材がフレッシュコンクリートのレオロジー定数に及ぼす影響を表すパラメータとしては、粒形と量との影響を表すものでなければならない。パラメータとして粒形と量との影響を別のもので表す方法と、1つの数値でもって表す方法とが考えられる。レオロジー構成式を検討するためには、これら両者の要因を1つのパラメータで表すことができれば、より簡単になるので、ここでは1つのパラメータで表せるものを検討することにする。

粒形がまるくなるに従ってレオロジー定数は小さくなり、粗骨材量が増加するとレオロジー定数は大きくなっている。このように粗骨材の形がまるくなるに従って小さくなり、その量の大小と同じ傾向を示すパラメータとしては、粗骨材の持つ表面積が考えられる。4.4.2 (7)で述べたようにして求めた粗骨材の比表面積を用いてコンクリート1m<sup>3</sup>に含まれる粗骨材の持つ総表面積を粗骨材総表面積  $S_g$  (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) として求め、相対レオロジー定数との関係を図4.61および図4.62に示す。

これらの図は、図4.61が図4.59、図4.62が図4.60に対応するものであり、粒形の違いに関係なく高い相関関係が得られている。しかし、図4.61を詳しく見ると、粗骨材総表面積が約150m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>すなわち粗骨材体積濃度が0.2以下では、その相関関係の傾きが異

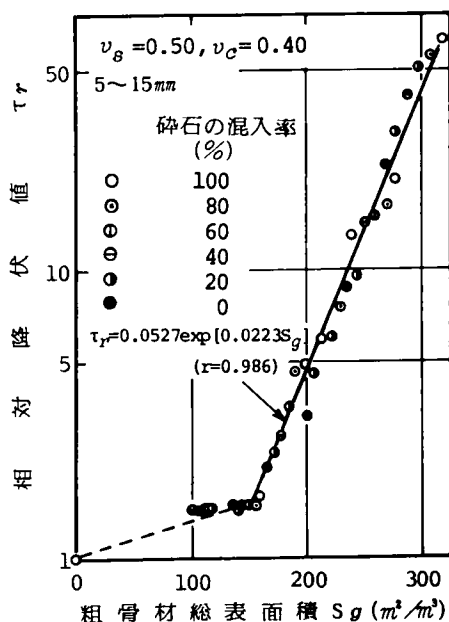


図4.61 粗骨材総表面積と相対降伏値との関係 (シリーズII)



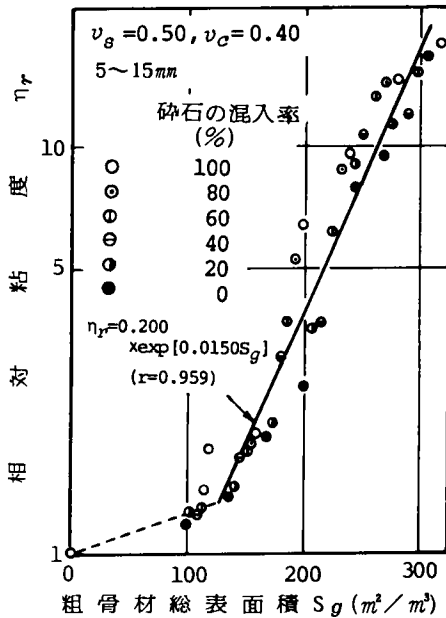


図4.62 粗骨材総表面積と相対粘度との関係（シリーズII）

なっている。粗骨材体積濃度0.2以下ということは、細骨材率が60～70%以上ということで、粗骨材の最大寸法15mmのコンクリートの配合としては一般的でない。

そこで、本研究では、粗骨材総表面積が150m²/m³をこえる配合についての相関式を求めることとする。図4.61および図4.62に見られるように、粗骨材総表面積と相対レオロジー一定数の対数とは線形関係と近似でき、次式を得ており、相関係数も高い値となっている。

$$\tau_r = 0.0527 \exp[0.0223 S_g] \quad (4.33)$$

(r = 0.986)

$$\eta_r = 0.200 \exp[0.0150 S_g] \quad (4.34)$$

(r = 0.959)

ここで、 $\tau_r$ ；フレッシュコンクリートの相対降伏値  
 $\eta_r$ ；フレッシュコンクリートの相対粘度  
 $S_g$ ；1 m³のコンクリート中の粗骨材の総表面積(m²/m³)  
 $r$ ；相関係数

このように、コンクリートに含まれる粗骨材の総表面積は、粗骨材の量および粒形の違いがコンクリ

ートの相対レオロジー一定数に及ぼす影響を表すよいパラメータである。

また、粗骨材の量と粒形とがコンクリートのレオロジー一定数に及ぼす影響を表すパラメータとして次のものも検討した。

2相材料の性質は、連続相および分散相の特性が一定であれば、分散相の量によって主に支配されることが知られている。フレッシュコンクリートの場合、連続相はモルタルであり、分散相は粗骨材であって、その量は粗骨材体積濃度で表される。すでに述べたように、レオロジー一定数は、図4.59および図4.60に見られるように、粗骨材量によって大きく変化しており、量が主な要因であることが示されている。しかし、粗骨材量が同じであっても粒形が異なれば、レオロジー一定数は相違している。したがって、この粒形の影響と量を表すパラメータを加味することによってこれら両者の影響を表すパラメータとすることができる可能性がある。

フレッシュコンクリートの粗骨材が分離した状況を観察すると、粗骨材の周りにはいくらのモルタル分が付着している。そのモルタル分は、粗骨材を持ち上げるなどしても粗骨材に付着したままで容易には取れない。フレッシュコンクリートが流動する場合においてもコンクリート中で粗骨材に付着し、粗骨材と一体となって挙動するモルタル分があると考えられる。このモルタル分は、粗骨材の表面積に密接な関係があり、粒形の違いを表すことができる。

そこで、粗骨材に付着してコンクリート中で粗骨材と一体となって挙動するモルタル分があると考え、4.4.2 (8)で述べたようにして求めた付着モルタル量と粗骨材量とを加えた体積のみかけの粗骨材体積濃度  $v_{ge}$  と相対レオロジー一定数との関係は、図4.63および図4.64となる。

図4.63は、図4.59および図4.61、図4.64は、図4.60および図4.62にそれぞれ対応し、次に示すように粗骨材総表面積をパラメータとした式(4.33)および式(4.34)の場合と同じ程度の相関関係が得られている。粗骨材総表面積の場合と同様に関係式を求めると、

$$\tau_r = 0.0497 \exp[10.4 v_{ge}] \quad (4.35)$$

(r = 0.979)

$$\eta_r = 0.197 \exp[6.88 v_{ge}] \quad (4.36)$$

(r = 0.940)

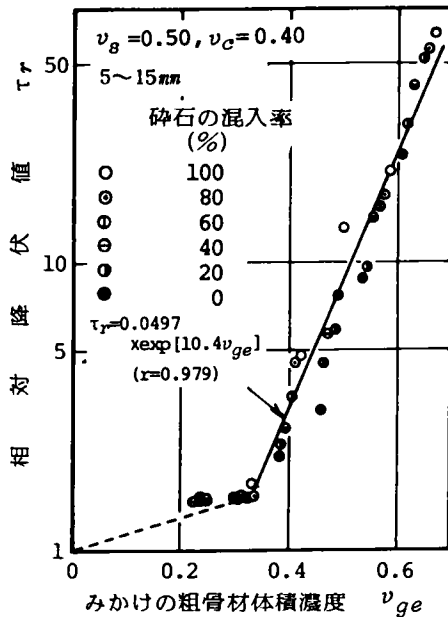


図4.63 みかけの粗骨材体積濃度と相対降伏値との関係 (シリーズII)

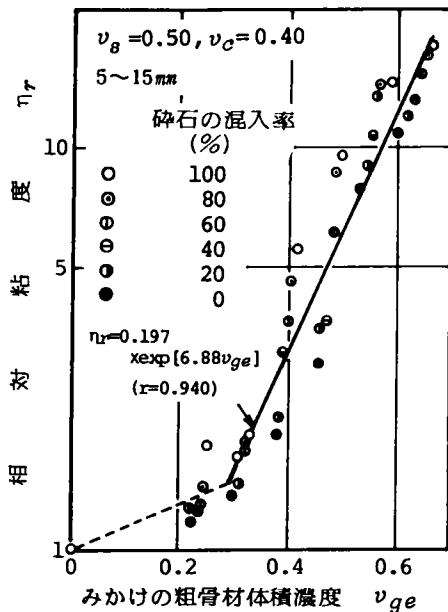


図4.64 みかけの粗骨材体積濃度と相対粘度との関係 (シリーズII)

ここで,  $\tau_r$  ; 相対降伏値

$\eta_r$  ; 相対粘度

$v_{ge}$  ; 付着モルタル量を加えたみかけの粗骨材体積濃度

$r$  ; 相関係数

となる。

したがって, 粗骨材総表面積をパラメータとした式(4.33)および式(4.34)の相関係数は, それぞれ0.986および0.959であり, みかけの粗骨材体積濃度をパラメータとした式(4.35)および式(4.36)の相関係数は, それぞれ0.979および0.940と若干小さいが, どちらのパラメータを用いても粗骨材の粒形および量がコンクリートのレオロジー定数に及ぼす影響を表すことができる。

#### (4) 粗骨材粒度とレオロジー定数との関係

本項(2)で述べたように, モルタルの性質や粗骨材量が同じであっても, 粗骨材の粒度が異なるとレオロジー定数は, 図4.57および図4.58に示されているように違っている。

そこで, 粗骨材の粒度が, フレッシュコンクリートのレオロジー定数に及ぼす影響を表すパラメータを求めるために, (3)で検討した粗骨材の総表面積  $S_g$  およびみかけの粗骨材体積濃度とも粗骨材の粒度の変化を表すことができるので, これらのパラメータについて実験的に検討する。

セメント体積濃度  $v_c = 0.40$ , 細骨材体積濃度  $v_s = 0.50$  とモルタルの性質を一定とした場合, 粗骨材の粒度を変化させた結果の図4.57および図4.58を粗骨材総表面積  $S_g$  およびみかけの粗骨材体積濃度  $v_{ge}$

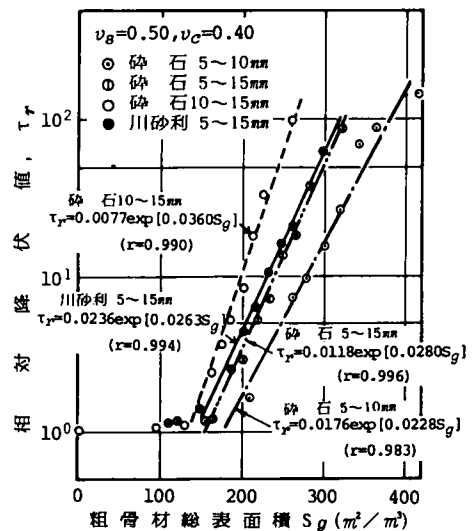


図4.65 粒度の異なる場合の粗骨材総表面積と相対降伏値との関係 (シリーズI)

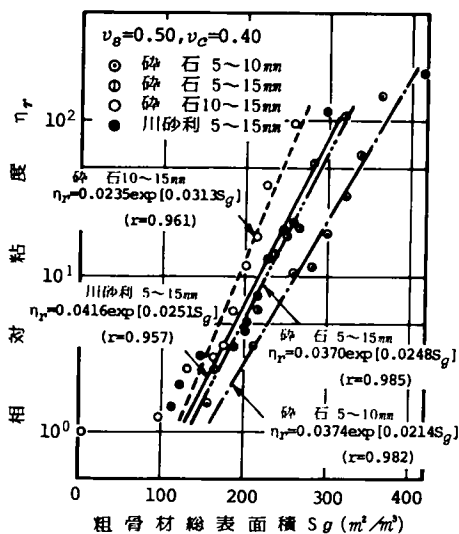


図4.66 粒度の異なる場合の粗骨材総表面積と相対粘度との関係 (シリーズI)

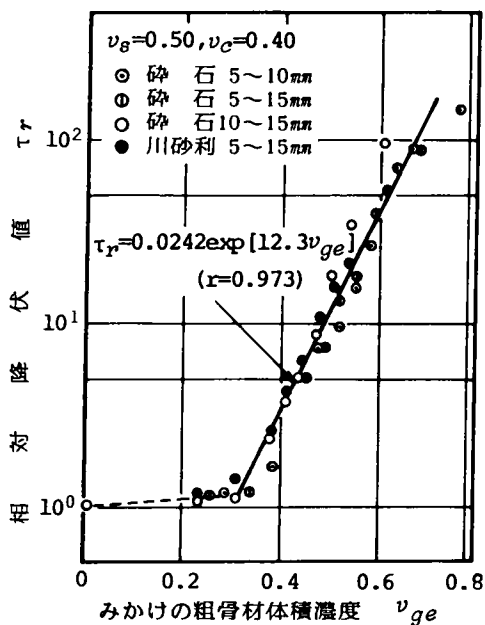


図4.67 粒度の異なる場合のみかけの粗骨材体積濃度と相対降伏値との関係 (シリーズI)

をパラメータとして整理しなおしてプロットすると図4.65～図4.68となる。

図4.65および図4.66に見られるように、粒形のみを変えた場合と異なり、粗骨材の粒度が変化する場合、粗骨材総表面積と相対レオロジー定数との関係

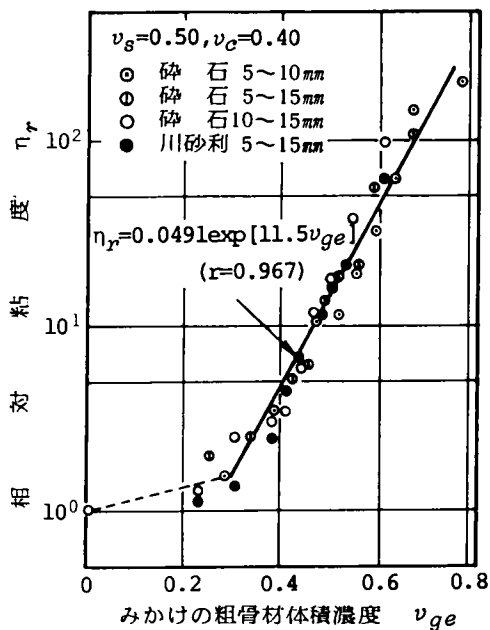


図4.68 粒度の異なる場合のみかけの粗骨材体積濃度と相対粘度との関係 (シリーズI)

は、粒度が同じであればそれぞれかなり高い相関関係があるが、粒度が異なるとその関係式は相違している。しかし、碎石5～15mmと川砂利5～15mmとは、よく似た結果となっており、(3)で述べたように粒形のみが変化する場合には、粗骨材総表面積をレオロジー構成式のパラメータとできることが示されている。

粗骨材に付着したモルタル量を加えたみかけの粗骨材体積濃度と相対レオロジー定数との関係を図4.67および図4.68に示す。これらの図に見られるように図4.65および図4.66の場合よりもそれぞれ粒度の違いによる差はほとんどなくなり、みかけの粗骨材体積濃度と相対レオロジー定数とは、それぞれ1つの関係式で表せると考えられる。しかし、(3)の場合と同様に粗骨材量が少ないときには、粗骨材量の増加によるレオロジー定数の増大がほとんどなく、粗骨材体積濃度が0.2未満のものは、1つの相関関係式で表すことはできないので、粗骨材体積濃度が0.2以上の一般的な配合の場合についての相関式を求めることにする。

相対レオロジー定数と、粗骨材の粒度と量との変化を表すみかけの粗骨材体積濃度との関係式は、

$$\tau_r = 0.0242 \exp[12.3 v_{ge}] \quad (4.37)$$

( $r = 0.973$ )

$$\eta_{pl} = 0.0491 \exp[11.5 v_{ge}] \quad (4.38)$$

( $r = 0.967$ )

ここで、 $\tau_r$ ：相対降伏値

$\eta_r$ ：相対粘度

$v_{ge}$ ：付着モルタル量を加えたみかけの粗骨材体積濃度

$r$ ：相関係数

となる。

このように、それぞれ高い相関係数をもって関係式が求められている。

したがって、前述の(3)の結果と合せ考えると、モルタルの性質が一定の場合には、粗骨材の粒度および粒形が変化しても、フレッシュコンクリート中で粗骨材に付着して粗骨材と一体となって流動するとした付着モルタル量を分散相すなわち粗骨材の一部と考えたみかけの粗骨材体積濃度をパラメータとして、フレッシュコンクリートのレオロジー構成式は、式(4.37)および式(4.38)のように表せる。

#### (5) モルタルの性質がレオロジー構成式に及ぼす影響

以上述べてきたように、モルタルの性質が一定ならば、粗骨材の粒度、粒形および量が変化してもみかけの粗骨材体積濃度をパラメータとしてフレッシュコンクリートのレオロジー構成式を表すことができる。しかし、図4.53～図4.58およびモルタルの配合が一定でセメントや細骨材の種類が異なる場合の式(4.35)と式(4.37)、式(4.36)と式(4.38)とを比較するとわかるように、モルタルの性質が異なるとその関係式は相違している。また、図4.69および図4.70は、それぞれ図4.67および図4.68にモルタルの性質が異なる場合を書き加えたものであるが、このことがよく示されており、角田ら<sup>(4-12)</sup>も降伏値について同様の結果を報告している。

このように、連続相であるモルタルのレオロジー一定数で除し、モルタルの性質と粗骨材要因とは独立してレオロジー一定数に影響しているとしている相対降伏値や相対粘度を用いても、モルタルの違いによるコンクリートのレオロジー一定数への影響を算定できない結果となっている。これは、モルタルの性質

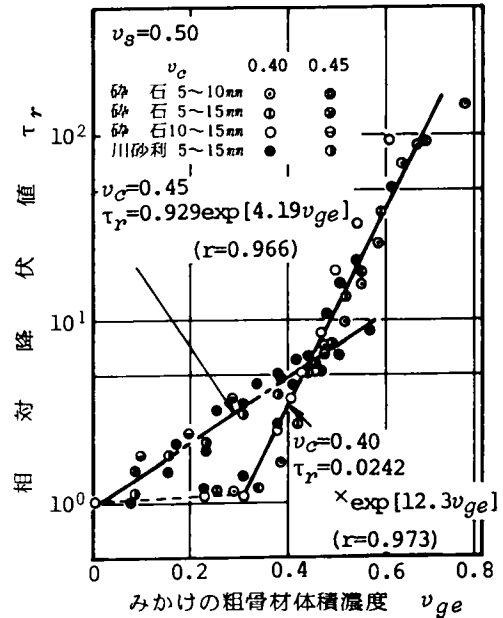


図4.69 モルタルの性質が異なる場合のレオロジー構成式の比較（降伏値、シリーズI）

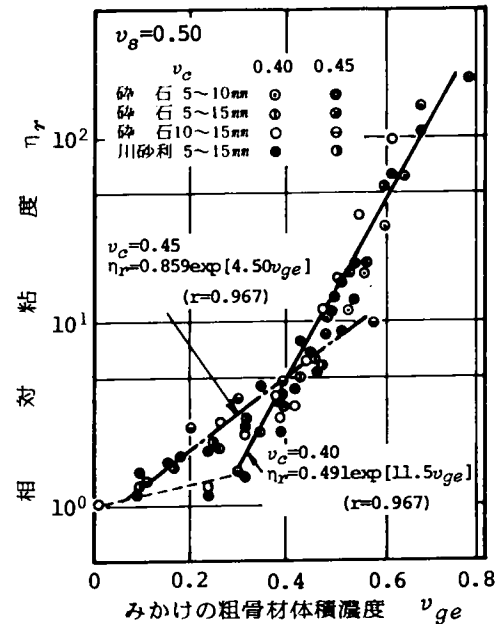


図4.70 モルタルの性質が異なる場合のレオロジー構成式の比較（型性粘度、シリーズI）

と粗骨材要因との相互作用の存在の無視あるいはモルタルの性質、粗骨材の量、粒度、粒形等に関係なく付着モルタル量を一定としたことなどに原因があ

ると考えられるので、以下これらのことについて検討する。

#### (6) モルタルの性質が異なる場合のレオロジー構成式の検討

モルタルの性質が異なる場合は相対レオロジー一定数を用いても、骨材要因のみでは、レオロジー構成式を表すことができず、この原因として配合要因や粗骨材特性を表すパラメータがお互に独立であるとしたことが考えられることを前述の(5)で指摘した。

(5)までは、付着モルタル量が配合によって変化しないとしていたので、表4.21のシリーズIIIに示すようにモルタルの性質を9種、粗骨材量を4種、粗骨材の種類を2種に変えた場合の付着モルタル量をすべて測定し、これを用いた表4.26のみかけの粗骨材体積濃度と相対レオロジー一定数との関係の1例を図4.71および図4.72に示す。

これらの図に示されているように、相対レオロジー一定数の対数とみかけの粗骨材体積濃度とは、みかけの粗骨材体積濃度0.2以上で、セメント体積濃度別に線形関係となっている。そこで、

$$\tau_r = a \exp[bv_{ge}] \quad (4.42)$$

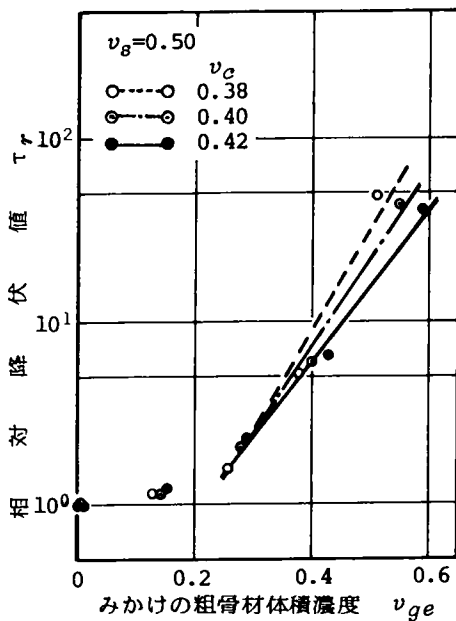


図4.71 みかけの粗骨材体積濃度と相対降伏値との関係  
( $v_g=0.50$ , シリーズIII)

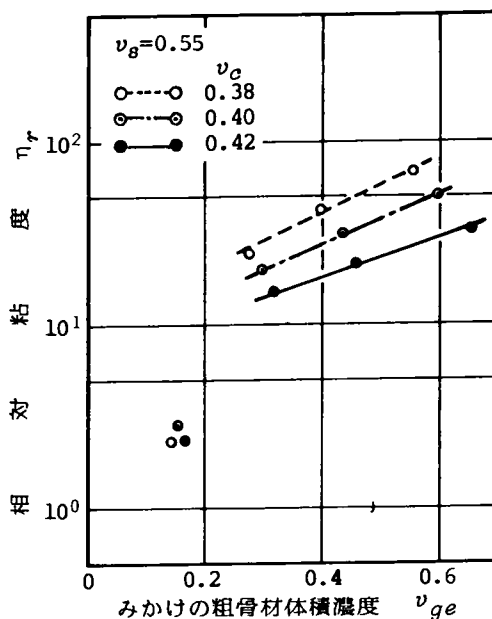


図4.72 みかけの粗骨材体積濃度と相対粘度との関係  
( $v_g=0.55$ , シリーズIII)

$$\eta_r = c \exp[dv_{ge}] \quad (4.43)$$

ここで、 $\tau_r$ は相対降伏値、

$\eta_r$ は相対粘度、

$v_{ge}$ は配合要因の影響を考慮したみかけの粗骨材体積濃度、

$a, b, c, d$ は実験定数

とおき、それらの関係式を求めると、図中のようになり、これらの係数をまとめて示すと、表4.28となる。

図4.71～図4.72および表4.28に見られるように、各係数は、セメント体積濃度や細骨材体積濃度が異なると変化している。したがって、本実験で求めたみかけの粗骨材体積濃度は、フレッシュコンクリートのレオロジー構成式のパラメータとしては不十分となる。

これは、モルタルの性質が異なると付着モルタル量では、モルタルの配合要因と粗骨材特性の相互作用の影響を評価し切っていないためと考えられる。

そこで、表4.2に示したモルタルを連続相とする以外のモデルすなわちフレッシュコンクリートをペー

表4.28 レオロジー構成式の係数 (シリーズIII)

$v_g$	$v_c$	関係式 $\tau_r = a \exp[b v_{ge}]$			関係式 $\eta_r = c \exp[d v_{ge}]$		
		係数 a	係数 b	相関係数	係数 c	係数 d	相関係数
0.45	0.38	0.0094	17.32	1.000	0.0052	19.73	1.000
	0.40	0.0566	12.79	0.986	0.0293	15.07	0.995
	0.42	0.0782	11.70	0.987	0.0463	13.44	0.995
0.50	0.38	0.0714	12.28	0.967	0.0706	12.35	0.975
	0.40	0.0887	11.15	0.990	0.0921	11.72	0.991
	0.42	0.1359	9.59	0.994	0.1130	10.03	0.992
0.55	0.38	3.994	4.604	0.982	8.912	3.777	0.988
	0.40	3.304	3.660	0.984	7.816	3.133	0.999
	0.42	2.844	2.575	0.998	6.858	2.430	0.999

ストと骨材とから成る2相材料あるいは水と固体粒子とから成る2相材料としてレオロジー構成式を検討する。

まず、骨材を分散相とした場合、細骨材と粗骨材を加えた骨材体積濃度では、骨材の粒度、粒形の影響を表すことができない。このため、粗骨材に付着して一体となって挙動する付着モルタルと細骨材に付着して一体となって挙動する付着ペーストをそれぞれ4.4.3 (3)および4.3.3 (6)に述べたように考え、これらを骨材量に加えたものをみかけの骨材体積濃度とし、これについて検討する。みかけの骨材体積濃度  $v_{ae}$  は、次式で表される。

$$\begin{aligned} v_{ae} &= v_{ge} + v_{se}(1 - v_g) - (v_{ge} - v_g) \\ &= v_g + (1 - v_g) v_{se} \end{aligned} \quad (4.44)$$

ここで、 $v_{ge}$  はみかけの粗骨材体積濃度、 $v_{se}$  はモルタル中のみかけの細骨材体積濃度、 $v_g$  は粗骨材体積濃度、 $1 - v_g$  は単位体積のコンクリート中のモルタル量である。

これを用いて実験シリーズIVの結果を示すと、図4.73および図4.74となる。

また、固体粒子を分散相とした場合には、セメントおよび細・粗骨材のみの体積を加えた固体粒子体積濃度  $v_{solidx}$  が考えられる。しかし、これでは、細・粗骨材の割合や粒度の違いの影響を含めることができないので、みかけの骨材体積濃度の場合と同様に細・粗骨材に付着しているペーストおよびモルタルを考え、これに含まれる水分を固定化水分量として

固体粒子に加えたみかけの固体粒子体積濃度  $v_{solidx}$  をパラメータとして検討する。これらのパラメータは、次式で表される。

$$v_{solidx} = v_g + (1 - v_g) v_s + (1 - v_g)(1 - v_s) v_c \quad (4.45)$$

$$\begin{aligned} v_{solidx} &= v_{ge} + v_{se}(1 - v_g) - (v_{ge} - v_g) \\ &+ (1 - v_g)(1 - v_s) v_c - (1 - v_g)(v_{se} - v_s) v_c \\ &= v_g + (1 - v_g)(v_{se} - v_{se} v_c + v_c) \end{aligned} \quad (4.46)$$

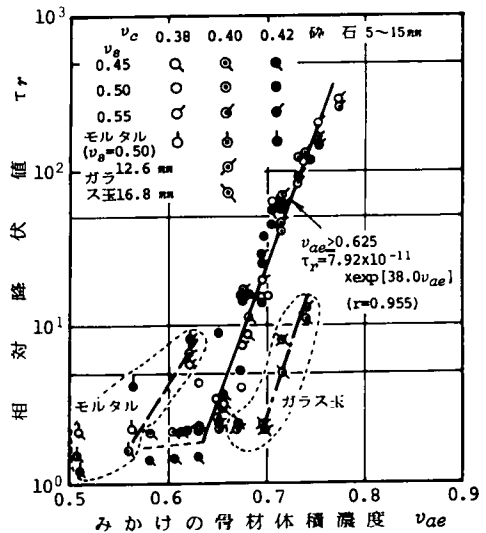


図4.73 みかけの骨材体積濃度と相対降伏値との関係 (シリーズIV)

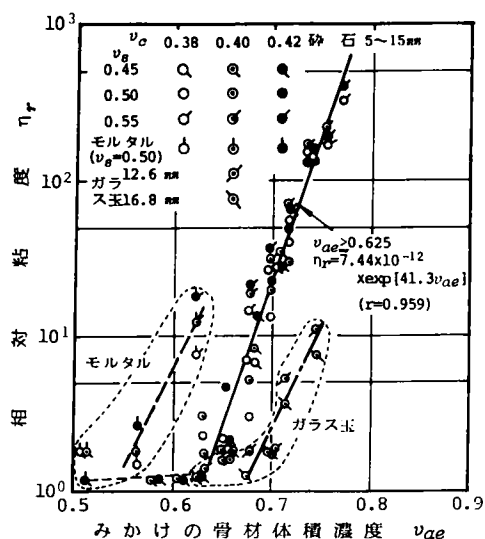


図4.74 みかけの骨材体積濃度と相対粘度との関係 (シリーズⅣ)

ここで、 $v_{solid}$ は固体粒子体積濃度、 $v_{solide}$ は水分固定を考慮したみかけの固体粒子体積濃度、 $v_g$ は粗骨材体積濃度、 $v_s$ はモルタル中の細骨材体積濃度、 $v_c$ はペースト中のセメント体積濃度、 $v_{ge}$ はみかけの粗骨材体積濃度、 $v_{se}$ はみかけの細骨材体積濃度(4.3.3(7)参照)、 $1 - v_g$ は単位体積のコンクリート中のモルタル量、 $(1 - v_g)(1 - v_s)$ は単位体積のコンクリート中のペースト量である。

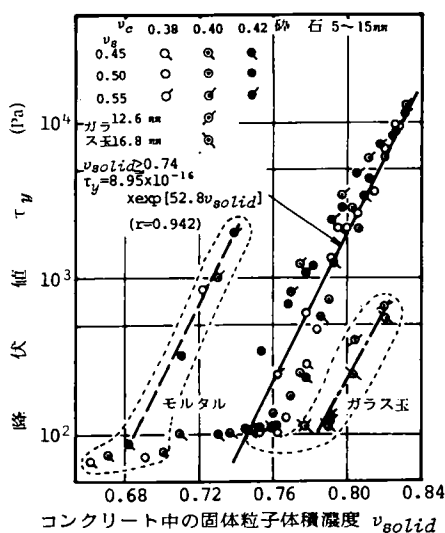


図4.75 固体粒子体積濃度と降伏値との関係 (シリーズⅣ)

これらのパラメータとフレッシュコンクリートのレオロジー定数との関係を図4.75～図4.78に示す。

図4.73～図4.78に示されているように、5～15mmの同一粒度で1種の砕石を用いたコンクリートでは、そのに含まれるモルタルの性質がフロー値で153～225と異なっているにもかかわらずいずれのパラメータを用いても一般的な配合になるある値以上

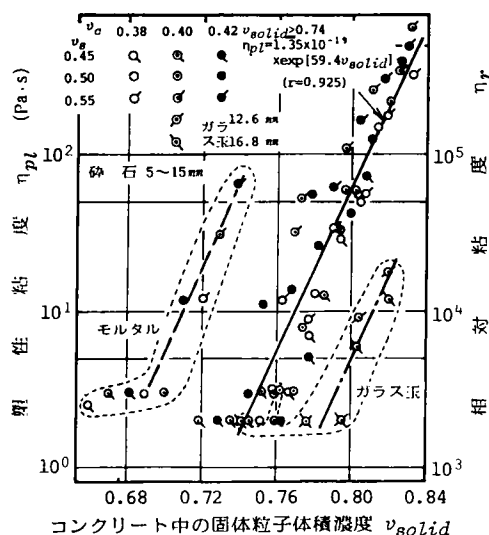


図4.76 固体粒子体積濃度と塑性粘度との関係 (シリーズⅣ)

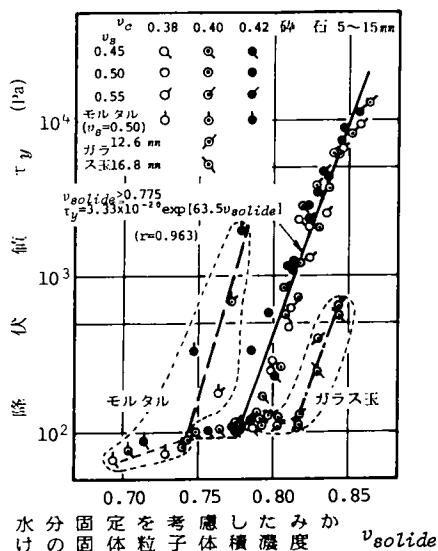


図4.77 みかけの固体粒子体積濃度と降伏値との関係 (シリーズⅣ)

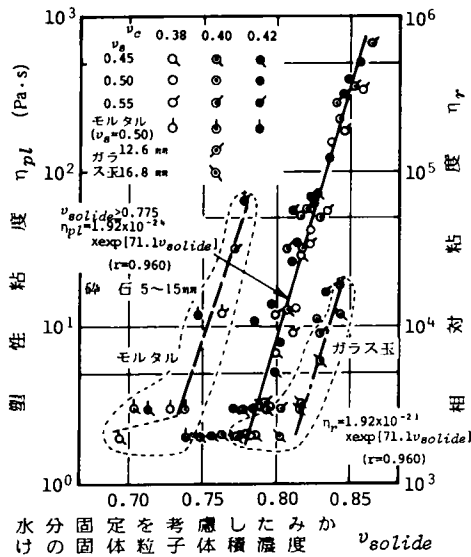


図4.78 みかけの固体粒子体積濃度と塑性粘度との関係  
(シリーズⅣ)

で、分散相を表すパラメータとレオロジー定数との関係は、線形と近似できると考えられる。レオロジー定数の対数とこれらパラメータとの関係式を式(4.42)および式(4.43)と同形式におくと、関係式は表4.29となる。

これらの図および表4.29に示されているように、それぞれかなり高い相関で関係式が得られている。詳しくみれば、相関係数は、水分固定を考慮したみかけの固体粒子体積濃度を用いたものが最も高く、単に固体粒子体積濃度を使用した場合が一番低い値となっている。

一方、モルタルやガラス玉を粗骨材としたコンクリートは、図4.73～図4.78に見られるように、これら3つのパラメータでは、いずれも砕石に対する関係式上に載っていない。これは、骨材の粒度・粒形の違いによる影響であると考えられる。

固体粒子体積濃度は、式(4.45)に示されているように骨材の粒度・粒形の影響を含んだパラメータとなっており、みかけの骨材体積濃度およびみかけの固体粒子体積濃度は、式(4.44)および式(4.46)に表されているように細骨材の粒度の影響を含められるようになっているが、結果的には粗骨材の粒度・粒形の違いを含むものとなっていないことが原因の1つであろう。しかし、これらの図に示されているように、測点数は少ないが、モルタルやガラス玉コンクリートの関係式の傾きは、砕石コンクリートとそれぞれほぼ同じであると考えられる。

このように、骨材の粒度・粒形が異なれば、関係式の傾きのみが異なることが推測され、表4.29に示した傾きを表す係数に粗骨材の粒度・粒形の影響を表すパラメータを導入することによって、より完全なフレッシュコンクリートのレオロジー構成式を求めることができると考えられ今後の検討課題である。

また、フレッシュコンクリートのレオロジー構成式のパラメータとしては、細骨材の粒度・粒形の影響を含めることができ、本実験の結果でも相関係数の一番高いみかけの固体粒子体積濃度が適当と考えられる。

したがって、フレッシュコンクリートのレオロジー構成式としては、水分固定を考慮したみかけの固体粒子体積濃度をパラメータとした表4.29に示した

表4.29 各種パラメータを用いたレオロジー構成式

レオロジー定数 パラメータ	降 伏 値		塑 性 粘 度		
	関係式	相関係数	式番号	関係式	相関係数
$v_{ae}$	$\tau_r = 7.92 \times 10^{-11} \exp[38.0 v_{ae}]$	0.955	4.47	$\eta_r = 7.44 \times 10^{-12} \exp[41.3 v_{ae}]$	0.959
$v_{solid}$	$\tau_y = 8.95 \times 10^{-16} \exp[52.8 v_{solid}]$	0.942	4.49	$\eta_{pl} = 1.35 \times 10^{-19} \exp[59.4 v_{solid}]$ $\eta_r = \eta_{pl} \times 10^3$	0.925
$v_{slide}$	$\tau_y = 3.33 \times 10^{-20} \exp[63.5 v_{slide}]$	0.963	4.51	$\eta_r = 1.92 \times 10^{-24} \exp[71.1 v_{slide}]$ $\eta_r = \eta_{pl} \times 10^3$	0.960

注)  $\tau_y$ : 降伏値 (Pa),  $\tau_r$ : 相対降伏値,  $\eta_{pl}$ : 塑性粘度 (Pa·s),  $\eta_r$ : 相対粘度



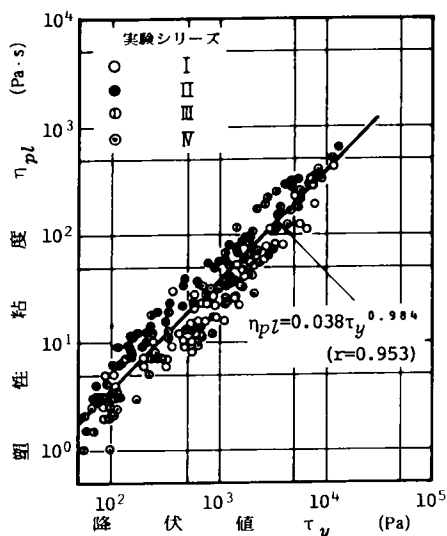


図4.79 フレッシュコンクリートの降伏値と塑性粘度との関係

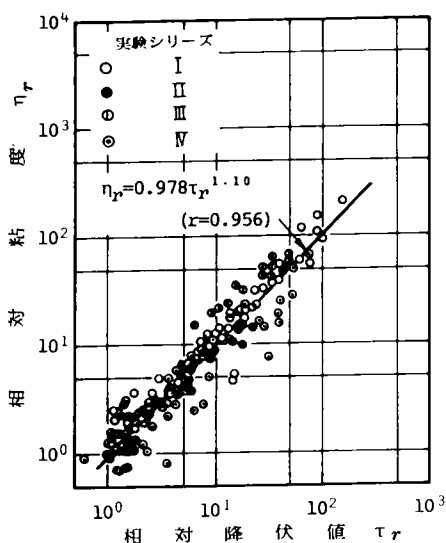


図4.80 フレッシュコンクリートの相対降伏値と相対粘度との関係

式(4.51)および式(4.52)が得られる。なお、粗骨材の量が一般の配合よりも非常に少ない場合には適用できず、粗骨材の粒度・粒形が異なる場合には、これらの式と同型式で表すことができるものの、粒度・粒形の影響を評価できるパラメータを関係式の傾きを表す係数に付加する必要がある。

#### (7) フレッシュコンクリートの降伏値と塑性粘度との関係

4.3.3 (8)で述べたように Tattersall<sup>(4-14)</sup>の説と異なり、本実験で得られたプレーンのフレッシュモルタルの降伏値と塑性粘度との間には、高い相関関係があり、どちらか一方の値がわかれば、もう一方の値はかなり高い精度で推定できる結果が得られている。

本節で得られた各配合の降伏値と塑性粘度との関係を図4.79に、相対降伏値と相対粘度との関係を図4.80に示す。

これらの図に示されているように相関係数は、ほぼ同じであり、どちらの表示方法でもよいことになるので、ここでは相対レオロジー定数の場合について述べることにする。

図4.80に見られるように、モルタルの場合とは異なり実験シリーズによって、この相関関係は若干相違しており、ベースとなるモルタルのレオロジー定数の測定精度およびフレッシュコンクリートのレオロジー定数の測定精度に問題点があることも考えられる。

一般的には、相対降伏値が増加すれば相対粘度も増大するという結果になっているが、同じ相対降伏値に対する相対粘度の最小値と最大値との比は2～3倍になっている。この違いが、コンクリートの施工から要求されるフレッシュコンクリートのレオロジー的性質としてどの程度意味を持つかは現在不明であるが、プレーンのフレッシュコンクリートの場合もモルタルの結果と同様に降伏値か塑性粘度のどちらか一方がわかれば、推定誤差は若干あるもののもう一方の値を大体推測できる。

#### 4.4.4 まとめ

以上述べてきたように、ビンガム物体と仮定したフレッシュコンクリートのレオロジー定数は、フレッシュモルタルの場合と同様に、その配合要因および粗骨材の粒度、粒形など構成材料の特性によって変化する。

コンクリートをモルタルと粗骨材とから成る2相材料と考え、モルタルのレオロジー定数でコンクリートのそれぞれのレオロジー定数を除した相対レオロジー定数すなわち相対降伏値および相対粘度は、モルタルの性質が同じ場合には、粗骨材の量、粒度および粒形の違いを表す粗骨材と一体となって流動するとした付着モルタル量を粗骨材量に加えたみか

けの粗骨材体積濃度をパラメータとして定量的に表すことができる。

モルタルの性質が異なる場合には、前述のみかけの粗骨材体積のみでは、コンクリートの配合要因が相対レオロジー定数に及ぼす影響を定量的に表すことはできない結果となっている。この場合には、細骨材に付着して一体となって挙動すると考えたペーストおよびモルタル中の固定化された水分も加えたみかけの固体粒子体積濃度を用いた次式に示すフレッシュコンクリートのレオロジー構成式が得られている。

$$\tau_y = 3.33 \times 10^{-20} \exp[63.5 v_{\text{solide}}] \quad (4.51)$$

$$(r = 0.963)$$

$$\eta_{pl} = \eta_r \times 10^{-3} = 1.92 \times 10^{-24} \exp[71.1 v_{\text{solide}}] \quad (4.52)$$

$$(r = 0.960)$$

ここで、 $\tau_y$  は降伏値 (Pa)、 $\eta_{pl}$  は塑性粘度 (Pa・s)、 $\eta_r$  は相対粘度 (連続相 = 水 = 0.001 Pa・s)、 $v_{\text{solide}}$  はみかけの固体粒子体積濃度 (式 (4.46) 参照) である。

なお、セメントの品質が一般の普通ポルトランドセメントと大きく異なる場合、細骨材の粒度や粒形が本実験で用いたものと大きく相違する場合などでは、これらの構成式の係数が異なる可能性が考えられる。また、この場合には、粗骨材の粒度や粒形の影響を表すパラメータを構成式の傾きを表す係数に付加する必要があるだろう。

フレッシュコンクリートのレオロジー構成式として提案されている角田らの式<sup>(4-12)</sup>とは、一般の配合の場合すなわち粗骨材量が多いときに、本実験の結果は、約10倍の値となり大きく異なっている。この原因としては、使用材料やレオロジー定数の測定装置が相違しているためと考えられ、この点については今後検討する必要がある。

また、本実験で用いたプレーンのフレッシュコンクリートのレオロジー定数および相対レオロジー定数相互間には、比較的高い相関関係があり、どちらか一方の値からもう一方の大きさをある程度推定できる。

なお、現在よく用いられているフレッシュコンク

リートのコンシステンシー試験値のVB値とは降伏値、塑性粘度ともに高い相関関係が得られている。スランプ値については、第6章で詳しく論じるのでここでは省略する。

## 4.5 結 語

コンクリートの施工条件から要求される適切なワーカビリティを持ったコンクリートを効率よく選定するためには、コンクリートの使用材料や配合要因と、ワーカビリティを表すコンクリート自身のレオロジー的性質との関係式すなわちフレッシュコンクリートのレオロジー構成式が必要である。

フレッシュコンクリートを連続相と分散相とから成る2相材料と考え、ビンガム物体すなわち降伏値と塑性粘度とで記述できる物質と仮定し、配合要因および使用材料主として細骨材および粗骨材の粒度、粒形とレオロジー定数との関係を、フレッシュペースト、モルタルおよびコンクリートについて実験的に定式化することを試みた。

また、ペースト、モルタルおよびコンクリートのレオロジー定数相互の関係、フロー値、スランプ値などとの関係についても実験的に検討した。

本章で得られた主な結果を要約すると以下のとおりである。

(1) フレッシュペーストのレオロジー定数は、測定方法によって相違し、本実験で用いた球ひきあげ粘度計、回転粘度計、平行板プラストメータのどの方法が適切であるかは、現在不明であり各測定装置の適用範囲を含めて今後の検討課題である。

(2) フレッシュペーストを水とセメント粒子とから成る2相材料と考え、広い範囲の配合について測定できる球ひきあげ粘度計による結果では、セメント体積濃度が高くなるすなわち水セメント比が小さくなるに従って降伏値および塑性粘度はともに増加しており、ペーストのレオロジー構成式は、セメントの品質が一定の場合、セメント体積濃度をパラメータとして求められた。

なお、本実験で得られたペーストのレオロジー定数は、従来の結果のなかでは大きな値を与えており、今後検討する必要があるだろう。

(3) フレッシュモルタルのレオロジー的性質に影響する要因としては、セメントペーストの性質すなわちセメント体積濃度、細骨材の量、粒度などがあ

り、セメント体積濃度が高くなる、細骨材量が多くなる、細骨材の粒度が細くなるなど、どれか1つでも変化すれば、降伏値および塑性粘度はともに大きくなる。その増加割合は、セメント体積濃度あるいは細骨材体積濃度が、0.5付近を境にして異なっており、この値を超えると大となっている。

(4) ペーストと細骨材とから成る2相材料と考えたフレッシュモルタルのレオロジー定数に及ぼす細骨材の量および粒度の影響は、細骨材粒子の表面に付着して細骨材と一体となって流動する厚さ $10\mu\text{m}$ と仮定した付着ペースト量を細骨材量に加えた、みかけの細骨材体積濃度をパラメータとして、定量的に評価することができ、高い相関で関係式が得られた。

なお、連続相のペーストの性質が変化する場合には、前の(3)で述べた関係式の係数が、ペーストの性質すなわちセメント体積濃度の関数となり、セメント体積濃度、細骨材の量および粒度が変化する場合のフレッシュモルタルのレオロジー構成式が求められた。

また、本研究で求められたレオロジー構成式による細骨材量の変化に対する増加量は、他の研究者のもの10倍程度となっている。これは、測定装置が異なることも1つの理由と考えられ今後検討する必要がある。

(5) フレッシュコンクリートのレオロジー定数もモルタルの場合と同様に、その配合要因および粗骨材の粒度、粒形の違いによって変化し、粗骨材量が増加、粒骨材の粒度が細かく粒形が角ばってくるとレオロジー定数は大きくなる。

(6) フレッシュコンクリートをモルタルと粗骨材とから成る2相材料と考え、モルタルのレオロジー定数でコンクリートのそれぞれのレオロジー定数で除した相対レオロジー定数すなわち相対降伏値および相対粘度は、モルタルの性質が一定の場合には、粗骨材の量、粒度および粒形の違いを表す粗骨材と一体となって流動するとした付着モルタル量を粗骨材量に加えた、みかけの粗骨材体積濃度をパラメータとして、定量的に表せる。

(7) モルタルの性質が異なる場合には、(6)で述べたみかけの粗骨材体積濃度のみでは、コンクリートの配合要因が相対レオロジー定数に及ぼす影響を定量的に表すことができず、細粗骨材に付着して一体

となって挙動するとしたペーストおよびモルタル中に含まれる固定化水分量を加えた、みかけの固体粒子体積濃度をパラメータとして、フレッシュコンクリートのレオロジー構成式が得られた。

しかし、セメントや細骨材の特性が本実験で用いたものと大きく異なる場合には、前述の構成式の係数が異なる可能性がある。粗骨材の粒度・粒形が異なる場合は、この影響を評価できるパラメータを付加する必要がある。

また、一般の配合の範囲で本実験の結果は、既往の提案式の約10倍の値を与えている。

(8) プレーンのフレッシュモルタルやフレッシュコンクリートのレオロジー定数すなわち降伏値と塑性粘度の間には、モルタルにおいては高い、コンクリートにおいてはかなり高い相関関係があり、どちらか一方の値から他の方の値をある程度推定できる。

(9) モルタルのフロー値や $\frac{1}{2}$ の縮尺のスランブコーンを用いたスランブ値と、モルタルの降伏値および塑性粘度との間には相関があり、これらの値でもって降伏値あるいは塑性粘度を推定できる。VB値と降伏値あるいは塑性粘度との相関関係は、フロー値やスランブ値に比べると低くなっている。また、モルタル用のコンシステンシー測定装置として $\frac{1}{2}$ 縮尺のスランブ試験は、十分使用できる。

以上、本章で得られた結果を述べたが、フレッシュモルタルやコンクリートなどのレオロジー的性質を検討するためには、広い範囲の配合すなわち硬い試料から軟らかい試料まで測定ができ、しかも、材料の分離の影響を含まない測定装置の開発が不可欠である。

また、本研究においては、空気量の影響については無視したが、AEコンクリートなど空気量が重要な役割をしているコンクリートにおいては、この影響を考慮する必要がある。

## 参考文献

- 4-1) 後藤, 平井, 花井; レオロジーとその応用, 共立出版, 1952, p.207.
- 4-2) 中川, 神戸; レオロジー, みすず書房, 1959, pp. 624-627.
- 4-3) 既出 4-1) p.209.
- 4-4) 既出 4-2) p.628.

- 4-5) 既出 4-1) pp.209—215.
- 4-6) 既出 4-1) pp.212—213.
- 4-7) 既出 4-1) pp.209—212.
- 4-8) 徳光；粒体のつめこみに関する研究，材料，Vol. 13, 1964, p.752.
- 4-9) 菊川；セメントペーストの粘性と粘度方程式，土木学会第35回年次学術講演会講演概要集，第5部，1980, pp.303—304.
- 4-10) 既出 4-1) p.212.
- 4-11) 森，乙竹；懸濁液の粘度について，化学工学，Vol. 20, 1956, pp.488—494.
- 4-12) 角田，明石；セメントペーストの粘度式について，セメント技術年報，Vol.32, 1978, pp.88—91.
- 4-13) 角田，藤井，明石；フレッシュコンクリートの粘度式について，セメント技術年報，Vol.33, 1979, pp. 227—230.
- 4-14) Hobbs, D. W. ; Influence of aggregate volume concentration upon the workability of concrete and some prediction from the viscosity-elasticity analogy, Mag. of Conc. Research, Vol.28, No.97, 1976, pp.191—202.
- 4-15) Ish-Shalom, M. ; The Rheology of Fresh Portland Cement Pastes, Proc. of the 4th Inter. Sympo. Chem. Cement, Washington, 1960, pp.731—748.
- 4-16) Powers, T. C. ; The Properties of Fresh Concrete, John Wiley & Sons. Inc., 1968, pp.461—464.
- 4-17) 岸谷，岡；フレッシュペーストおよびモルタルのレオロジー定数測定，日本建築学会論文報告集，No. 305, 1981, pp.1—7.
- 4-18) Murata, J. and H. Kikukawa ; Studies on rheological analysis of fresh concrete, RILEM Seminar Proceedings, Fresh Concrete, Vol. 1, 1973, pp.1.2-1—1.2-33.
- 4-19) 菊川；セメントペーストの粘度方程式と降伏応力の推定，土木学会第36回年次学術講演会講演概要集，第5部，1981, pp.352—353.
- 4-20) 村田，菊川，杉山；回転粘度計におけるフレッシュコンクリートの流動解析，セメント技術年報，Vol. 29, 1975, pp.204—207.
- 4-21) 既出 4-16) pp.492—493.
- 4-22) 菊川；モルタルの粘度方程式におよぼす骨材の形状および粒形の影響，土木学会第34回年次学術講演会講演概要集，第5部，1979, pp.75—76.
- 4-23) 既出 4-16) pp.26—34.
- 4-24) Loudon, A. G. ; The Computation of Permeability from Simple Soil Tests, Géotechnique, 1952, pp.165—183.
- 4-25) 松尾；骨材の表面積に関する研究，セメント技術年報，第1報，Vol. 3, 1949, pp.170—176，第2報，Vol. 4, 1950, pp.183—192，第3報，Vol. 5, 1951, pp.226—230.
- 4-26) 太田；ステアリン酸単分子膜に依る骨材の表面積測定について，土木学会誌，Vol.36, No. 3, 1951, pp.146—148.
- 4-27) 太田；骨材の表面積と新表面積法による構築混合物の検討とその應用に関する研究，土木学会論文集，No.61, 別冊3—3, 1959, pp.1—48.
- 4-28) 荒木；コンクリートの各種性質におよぼす不連続粒度骨材の影響に関する研究，京都大学学位論文，1960, p.56.
- 4-29) 岡田，六車；改訂新版コンクリート工学ハンドブック，朝倉書店，1981, pp.90—91.
- 4-30) Moncrieff, D. S. ; The Effect of Grading and Shape on the Bulk Density of Concrete Aggregates, Concrete Research, Dec. 1953, pp.67—70.
- 4-31) Shergold, F. A. ; The Percentage Voids in Compacted Gravel as a Measure of its Angularity, Mag. of Conc. Research, Vol. 5, No.13, 1953, pp.3—10.
- 4-32) 菊本；細骨材の粒形および粒度がモルタルの性質におよぼす影響，セメントコンクリート，No. 286, pp.2—8.
- 4-33) Hughes, B. P. and B. Bahramian ; A Laboratory Test for Determining the Angularity of Aggregate, Mag. of Conc. Research, Vol.18, No. 56, 1966, pp.147—152.
- 4-34) 飯岡，豊福；コンクリートの強度および耐久性におよぼす骨材粒の特質，セメント技術年報，Vol.31, 1977, pp.191—195.
- 4-35) Rex, H. M. and R. A. Peck ; A Laboratory Test to Evaluate the Shape and Surface Texture of Fine Aggregate Particles, Jour. of Public Roads, Vol.29, 1956, pp.118—120.
- 4-36) 神田，吉田，松崎，奥山；砂の粒度・形状の簡易判定方法とコンクリートの単位水量の推定に関する研究，セメントコンクリート，No.392, 1979, pp.18—24.
- 4-37) Kennedy, C. T. ; The Design of Concrete Mixes, Jour. of ACI, Vol.36, 1940, pp.373—400.
- 4-38) Newman, A. J. and D. C. Teychenné ; A classification of natural sands and its use in concrete mix design, Proc. of a Sympo. on Mix Design and Quality Control of Concrete, 1954, pp.175—207.
- 4-39) 徳光；砂の粒度および量とモルタルの諸性質の

- 関係について，土木学会論文集，No.96，1963，pp. 15—22.
- 4-40) 徳光；不連続粒度の骨材を用いたコンクリートについて，土木学会誌，Vol.50，No.1，1965，pp. 45—50.
- 4-41) Tattersall, G. H. : The rationale of a two-point workability test, Mag. of Conc. Research, Vol.25, No.84, 1973, pp.169—172.

## 第5章 フレッシュコンクリートのレオロジー的性質に 及ぼす経過時間の影響に関する研究

### 5.1 概 説

セメントは、水と接触するとただちに激しい反応が数分間続き、その後ゆっくりした水和反応が継続するが、このゲルの生成に関連する過程は、やがてすみやかにペーストをこわばらせることになる。このようなこわばりが起こるにもかかわらずペーストの流動性は、かなりの時間きわめてわずかしき変化しないといわれている。

これは、前述の凝結作用の早期に起こるこわばりは機械的な操作によって再び元にもどるような性質すなわちチクソトロピーを示すためだと説明されている。<sup>5-1)</sup>

しかし、もっと長時間になるとペーストやコンクリートの流動性が低下することはよく知られている。<sup>5-2,3)</sup>この経過時間によるコンクリートの性質変化は、コンクリートの製造、運搬時間、打設方法などコンクリート工事全般において知る必要がある。

従来この性質の変化に対しては、コンクリートのスランプ値<sup>5-2,3)</sup>やプロクターの貫入抵抗値<sup>5-4)</sup>などで測定され、実用されている。スランプ値は、第6章で述べるようにフレッシュコンクリートをビンガム物体と仮定したときの降伏値のよい指標であることが示されているが、第2章2.5で述べたように、スランプ値のみではフレッシュコンクリートのレオロジー的性質を完全に表すことはできないことも考えられる。貫入抵抗値もそのレオロジー的意義は不明である。

また、施工の各工程における施工条件とそれによって要求されるフレッシュコンクリートのレオロジー的性質とを結びつけるためには、練り混ぜてからの経過時間によるフレッシュコンクリートの性質の変化をビンガム物体などに仮定してレオロジー的に調べる必要がある。

村田<sup>5-5)</sup>は、図2.11および図5.1に示したような

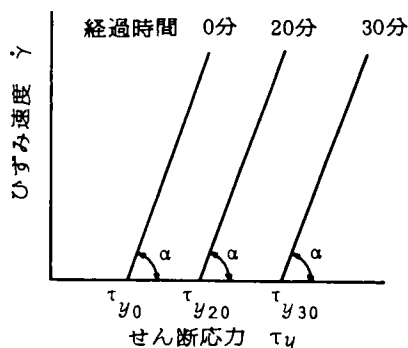


図5.1 経過時間とコンシステンシー曲線との関係<sup>5-5)</sup>

経過時間とレオロジー定数との関係を報告し、経過時間30分程度までは塑性粘度はほとんど変化せず降伏値のみが増加し、図5.1のようなコンシステンシー曲線が得られ、これは水和が起こっていないと見なせる範囲で、ごく軽微な水和により若干のゲルが発生し、粒子間摩擦が変化して降伏値のみが増加すると説明している。Czernin<sup>5-11)</sup>は、前述したように経過時間が短いときには、チクソトロピーにより流動性は変化しないと述べており、村田の見解<sup>5-5)</sup>とは異なっている。この他、経過時間によるコンクリートの性質変化に関するレオロジー的研究は、ほとんどないようである。

一方、施工の過程において型枠に作用する側圧を問題とする場合以外は、フレッシュコンクリートが流動しているときにどのような性質を示すかということが主な問題となる。

そこで、本章では、施工条件とそれによって要求されるフレッシュコンクリートのレオロジー的性質とを結びつける基礎資料を得るために、経過時間によるコンクリートのレオロジー的性質の変化について検討する。ここでは、レデーミクストコンクリートを対象として、初期スランプ値、単位セメント量、

コンクリート温度、混和剤の種類およびスランプロス低減剤の使用量を変えて、練り混ぜ後の経過時間すなわち運搬時間をシミュレートしたアジテーション時間によってビンガム物体と仮定したフレッシュコンクリートのレオロジー定数の変化について検討する。

## 5.2 実験計画および実験の方法

### 5.2.1 実験計画

トラックアジテータによる運搬時間をシミュレートしたアジテーション時間による性質変化に及ぼす要因としては、内的要因すなわち配合要因と外的要因すなわち環境要因とが考えられる。

実験は、表 5.1 および表 5.2 に示す次の 2 つのシリーズに分けて計画した。

シリーズ I；プレーンおよび AE 剤あるいは減水剤を用いたコンクリートに関する実験

シリーズ II；スランプロスを低減させる効果を持

つ混和剤を用いたコンクリートに関する実験

シリーズ I では、配合要因として表 5.1 に示すように土木用コンクリートを対象として初期スランプ値を 5, 10 および 15 cm の 3 種, レオロジー定数測定装置の関係から粗骨材の最大寸法を 15 mm としたため単位セメント量を一般より少し多くした 350 kg/m<sup>3</sup> および比較のための 420 kg/m<sup>3</sup> に変え、一部 AE 剤および標準型・遅延型および早強型の減水剤を用いた。環境要因としては、アジテーション時間およびコンクリート温度を採用し、アジテーション時間は、各測定が可能な 120～180 分までとし、コンクリート温度は 10, 20 および 30℃ に変えた。

試験項目は、スランプ値、レオロジー定数および空気量とし、各要因、試験項目の組合せは、表 5.1 に示すものとした。

表 5.2 に示すシリーズ II では、時間経過によるスランプロスを低減させる効果があるといわれているスランプロス低減剤がアジテーションを行ったコンクリートの性質に及ぼす影響を調べた。

表 5.1 プレーンおよび混和剤を用いたコンクリートに関する実験計画（シリーズ I）

粗骨材の最大寸法 (mm)		15																													
初期スランプ値 (cm)		5					10					15					10														
単位セメント量 ( kg/m <sup>3</sup> )		350										,					420					350									
混 和 剤		プ レ ー ン															A E 剤 減水剤 (標準・遅延・早強型)														
コンクリート温度 (°C)		10					,					20					,					30					20				
アジテーション時間 (min)		0	30	60	90	120	0	30	60	90	120	180	0	30	60	90	120	180	0	30	60	90	120								
試 験 項 目	ス ラ ン プ	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●								
	レオロジー定数	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●								
	空 気 量	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●								

注) 測定したものを●印で示す。

表 5.2 スランプロス低減剤を用いたコンクリートに関する実験計画（シリーズ II）

粗骨材の最大寸法 (mm)		15																											
初期スランプ値 (cm)		18																											
単位セメント量 (kg/m³)		350										350 , 500					500												
スランプロス低減剤使用量 (%)		0 , 0.6					0, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4					0 , 1.0					0, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4												
コンクリート温度 (°C)		20					10, 20, 30					20					20												
アジテーション時間 (min)		0	30	60	90	120	150	180	0	30	60	90	120	150	180	0	30	60	90	120	150	180	0	30	60	90	120	150	180
試験項目	ス ラ ン プ	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	レオロジー定数	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	空 気 量	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	

注) 測定したものを●印で示す。

配合要因は、土木学会規準の AE 剤規格および減水剤規格<sup>5-6)</sup>および日本建築学会の JASS 5 T-401<sup>5-7)</sup>コンクリート用表面活性剤の品質規準を参考とし、シリーズ I と同様に粗骨材の最大寸法を 15 mm としたので単位セメント量は 350 kg/m<sup>3</sup>とし、初期スランプ値 18 cm、スランプロス低減剤の使用量はその効果を検討するためセメント質量の 0, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 および 1.4 % に変えた。アジテーション時間は 0 ~ 180 分、コンクリート温度は主として 20℃ とし一部 10 および 30℃ とした。

試験項目は、スランプ値、コンクリートをビンガム物体と仮定したレオロジー定数および空気量とした。

これらの組合せは、表 5.2 に示す。

なお、測定は、各条件とも日を変えて 2 回行い、その平均を測定値とした。

## 5.2.2 実験の方法

### (1) 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメントを使用した。シリーズ I では、比重 3.16、ブレン値 3 120 cm<sup>3</sup>/g、フロー値 250 のセメントを用いた。シリーズ II では、銘柄の異なる比重 3.17、ブレン値 3 110 cm<sup>3</sup>/g、フロー値 253、比重 3.17、ブレン値 3 220 cm<sup>3</sup>/g、フロー値 253 および比重 3.16、ブレン値 3 240 cm<sup>3</sup>/g、フロー値 252 の 3 種のセメントを等量混合して使用した。

細骨材は、シリーズ I では粗粒率 2.57 の土木学会の標準粒度範囲のほぼ中央になる吉野川産の川砂、シリーズ II では粗粒率 2.25 の土木学会の標準粒度範囲にほぼはいる旧吉野川産川砂を用いた。使用に当っては、湿潤状態で貯蔵したものを使用直前に含水率を測定し、水分量を補正して使用した。

粗骨材は、最大寸法 15 mm の徳島県大麻産の硬質和泉砂岩碎石を用いた。碎石は、15 ~ 13 mm, 13 ~ 10 mm および 10 ~ 5 mm にふり分けて表面乾燥飽水状態で貯蔵し、質量比で 2 : 2 : 6 に再混合して粗粒率 6.45 としたものを使用した。骨材の物理試験結果を、表 5.3 に示す。

混和剤としてシリーズ I では、陰イオン系樹脂酸塩を主成分とする AE 剤を所定の空気量になるように使用し、減水剤としては、リグニンスルホン酸カルシウムを主成分とする標準型、遅延型および早

表5.3 骨材の物理試験結果

	細 骨 材		粗 骨 材
	シリーズ I	シリーズ II	
比 重	2.63	2.63	2.60
吸 水 率 ( % )	1.44	1.20	1.70
粗 粒 率 ( F.M.)	2.57	2.25	6.45

強型のものを用いた。

シリーズ II では、同一メーカーのリグニンスルホン酸誘導体を主成分とする遅延型減水剤、AE 助剤および特殊リグニンスルホン酸誘導体を主成分とする濃度 330 g/l のスランプロス低減剤を使用した。

使用に際して、減水剤は原液を 5 倍、AE 助剤は 100 倍に薄めて計量し練りませ水に加えた。スランプロス低減剤は、濃度 165 g/l として計量し使用した。

### (2) コンクリートの配合

シリーズ I では、表 5.1 に示すように初期スランプ値、単位セメント量、コンクリート温度および混和剤の影響を調べるため、初期スランプ値は、5, 10 および 15 cm とし ± 1 cm の範囲にはいるようにした。単位セメント量は、本節の 5.2.1 で述べた理由から 350 kg/m<sup>3</sup> および 420 kg/m<sup>3</sup> とした。コンクリート温度は、10, 20 および 30℃ とし ± 2℃ の範囲にはいるようにした。混和剤の使用量は、メーカーの推奨量とした。示方配合は、表 5.4 に示す。

シリーズ II では、スランプロス低減剤の効果を調べるため、表 5.2 に示すように初期スランプ値を 18 ± 1 cm、単位セメント量を 350 kg/m<sup>3</sup> と一部比較のため 500 kg/m<sup>3</sup> とした。コンクリート温度は、主として 20℃ とし一部 10 および 30℃ に変えた。初期空気量は、5.5 ± 0.5 % を目標とし、スランプロス低減剤と同一メーカーの遅延型減水剤をメーカー推奨量の固形分で 0.25 % 用いたものをベースコンクリートとし、スランプロス低減剤の使用量をセメント質量に対して、固形分で、0 (ベースコンクリート), 0.15, 0.2, 0.25, 0.30 および 0.35 % に変えた。これらの示方配合は、表 5.5 に示す。

### (3) コンクリートの練り混ぜおよびアジテーション

コンクリートの練り混ぜには、強制練り山中式ジェットミキサを使用した。材料は、細骨材、セメント、粗骨材の順に投入し、ミキサを回転させながら



表5.4 コンクリートの示方配合 (シリーズI)

配合番号	コンクリート温度 (°C)	粗骨材の最大寸法 M <sub>s</sub> (mm)	スランブ値の範囲 Sl. (cm)	空気量の範囲 A (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m³)								
							水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤				
											種類	使用量			
30- 5-350 30-10-350 30-15-350 30- 5-420 30-10-420 30-15-420	30	15	5:1 10:1 15:1	-	53 58 61	50 52 53	185 202 214	350	937 921 923	908 880 846	-	-			
5:1 10:1 15:1			45 48 51		49 202 214	190 866 857	908 885 852								
5:1 10:1 15:1			59 60 45		52 210 189	933 929 892	884 850 885								
5:1 10:1 15:1			50 52 54		47 183 184	863 881 887	993 958 949	A E 剤 標準型減水剤 遅延型減水剤 早強型減水剤	3.4 3.5 2.8 7.0						
5:1 10:1 15:1			54 56 58		53 54 54	190 196 203	960 966 963	861 839 824	-	-					
5:1 10:1 15:1			42 45 47		49 50 50	178 190 197	885 877 901	910 887 844							
10- 5-350 10-10-350 10-15-350 10- 5-420 10-10-420 10-15-420	10		15	5:1 10:1 15:1	-	54 56 58	53 54 54	190 196 203			350	960 966 963	861 839 824	-	-
5:1 10:1 15:1				42 45 47		49 50 50	178 190 197	885 877 901				910 887 844			
5:1 10:1 15:1				54 56 58		53 54 54	190 196 203	960 966 963				861 839 824			
5:1 10:1 15:1				42 45 47		49 50 50	178 190 197	885 877 901			910 887 844				
5:1 10:1 15:1				54 56 58		53 54 54	190 196 203	960 966 963	861 839 824						
5:1 10:1 15:1				42 45 47		49 50 50	178 190 197	885 877 901	910 887 844						

表5.5 コンクリート示方配合 (シリーズII)

配合番号	コンクリート温度 (°C)	スランブロス低減剤添加量 (%)	粗骨材の最大寸法 M <sub>s</sub> (mm)	スランブ値の範囲 Sl. (cm)	空気量の範囲 A (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m³)					
								単 位 量				混 和 剤	
								水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	減水剤	スランブロス低減剤**
30-350- 0	30	0	15	18±1	5.5±0.5	57	49	200	350	818	841	1.75	0
30-350-20		0.20				56		196		823	847		2.10
30-350-25		0.25				56		195		824	848		2.63
30-350-30		0.30				55		194		826	849		3.15
30-350-35		0.35				55		193		827	851		3.68
20-350- 0	20	0				56	49	195	350	824	848	1.75	0
20-350-15		0.15				55		192		828	852		1.58
20-350-20		0.20				55		191		829	853		2.10
20-350-25		0.25				54		190		831	855		2.63
20-350-30		0.30				54		189		832	856		3.15
20-350-35		0.35				54		188		833	857		3.68
20-500- 0		0				42	47	210	500	714	795	2.50	0
20-500-15		0.15				41		207		717	800		2.25
20-500-20		0.20				41		206		719	801		3.00
20-500-25		0.25				41		205		720	802		3.75
20-500-30		0.30				41		204		721	804		4.50
20-500-35		0.35				41		203		722	805		5.25
10-350- 0	10	0				54	49	190	350	831	855	1.75	0
10-350-20		0.20				53		186		836	860		2.10
10-350-25		0.25				53		185		837	861		2.63
10-350-30		0.30				53		184		837	863		3.15
10-350-35		0.35				52		183		840	864		3.68

注) \*セメント質量に対する固形分の百分率、\*\* 濃度330 g/lのもの

約10秒間で注水した。混和剤を用いた配合では、所定量の混和剤を練り混ぜ水にあらかじめ加えておき使用した。

シリーズIでは、全材料投入後3分間で試料70ℓを練り混ぜた。シリーズIIでは、減水剤およびAE助剤を加えた練り混ぜ水を投入後1分間練り混ぜ、その後ミキサーを回転させながら濃度165 g/ℓのスランブロス低減剤を約5秒間で所定量投入し、さらに2分間合計3分間で試料70ℓを練り混ぜた。

また、所定のコンクリート温度とするために、室

温を所定の温度に近づけ、さらに練り混ぜ水の温度を変えて所定温度の±1.5℃にはいるようにした。

トラックアジテータによる運搬時間をシミュレートするものとしては、実験室内で使用できるアジテーション装置でのアジテーション時間とした。アジテーション装置は、3 m³トラックアジテータの回転数3回/分の周速に相当する0.31 m/sとした図5.2に示す胴廻り2.5 mの改造100ℓ練り可傾式ミキサーを使用した。

また、アジテーション中のコンクリートの温度は、

試験室の室温を所定のコンクリート温度よりも若干低めにして管理した。アジテーション中のコンクリートの水分の蒸発は、図 5.2 に示すように改造したミキサの開口部を湿布でふたをし、また試験室内の湿度が 70 % 以上になるようにして極力防いだ。

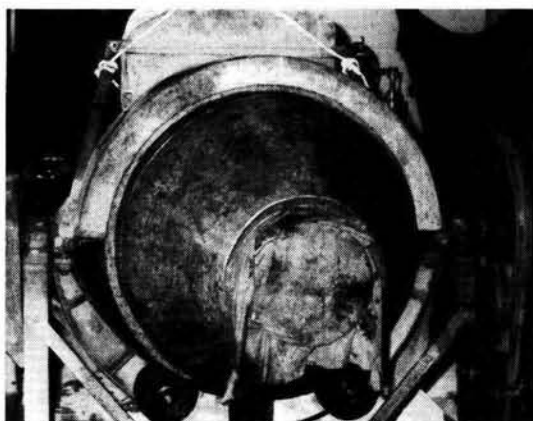


図 5.2 可傾式ミキサを改造したアジテーション装置

#### (4) フレッシュコンクリートの試験

練り混ぜ終了後練り板上に排出したコンクリートは、2 往復切り返した後、表 5.1 および表 5.2 に示した実験計画に従って、JIS A 1101 によるスランプ試験および JIS A 1128 による空気量試験を行った。各試験は、同時に 2 個測定し、その平均を測定値とした。

レオロジー定数は、スランプ値の大きい配合では若干の誤差を含むことも考えられるが、第 3 章 3.5 で検討した平行板プラストメータⅢ型を使用して求めた。平行円板の直径は 60 cm、試料高さは約 6 cm とした。その他の測定方法は、第 4 章 4.4 で述べた平行板プラストメータによる測定方法と同一とした。その後、全試料を本項(3)で述べたアジテーション装置を用いて所定のアジテーション時間までアジテートし、試験に必要な量だけ排出し、計画した試験を行った。試験終了後アジテーション装置に戻して、アジテーションを継続し、スランプ値が 2～3 cm になるまで各時間での測定を行った。

なお、1 回の測定は約 4 分で終るようにし、測定中のアジテーション時間のロスは無視した。

また、各測定時にアルコール棒状温度計でコンクリート温度を測定した。

### 5.3 プレーンおよび混和剤を用いたコンクリートに関する実験結果およびその考察

#### 5.3.1 はじめに

本節では、プレーンおよび混和剤を用いたコンクリートのアジテーションによるスランプ値およびレオロジー定数の変化について述べる。

実験要因として、コンクリート温度およびアジテーションをする前のコンクリートのスランプ値（初期スランプ値）を採用し、これらを変化させたので、考察においてはこれらの値のばらつきがまず問題となる。

コンクリート温度については、1、2 の例外はあるが、測定終了時までの各試料温度は、コンクリート温度 30℃ のもので 28～30℃、20℃ のもので 19～21℃、10℃ のもので 9～11℃ の範囲にあり、各コンクリート温度での温度の違いによる影響は小さいと考えられるので、考察においてはこれらの各温度における相違は無視し、公称の 30℃、20℃ および 10℃ として整理検討する。

アジテーション前の初期スランプ値は、それぞれ所定のスランプ値の±1 cm の範囲にはいっているので、それぞれの初期スランプ値における違いの影響も小さいと考えられるので、初期スランプ値は、公称の 15 cm、10 cm および 5 cm として整理し、考察する。

#### 5.3.2 プレーンコンクリートのアジテーション時間によるスランプ値の変化

時間経過によるスランプ値の変化については、古くから研究されており、時間とともにスランプ値は低下し、温度が高いほどその低下の割合は大であるとされている。<sup>5-8)</sup>

本実験で得られた単位セメント量が 350 kg/m<sup>3</sup> および 420 kg/m<sup>3</sup> の配合のアジテーション時間とスランプ値との関係をそれぞれ図 5.3 および図 5.4 に示す。

これらの図に見られるようにアジテーション時間が長くなると単位セメント量、初期スランプ値、コンクリート温度が異なってもスランプ値は、すべて小さくなっており、従来の結果<sup>5-8)</sup>と同様に低下の傾

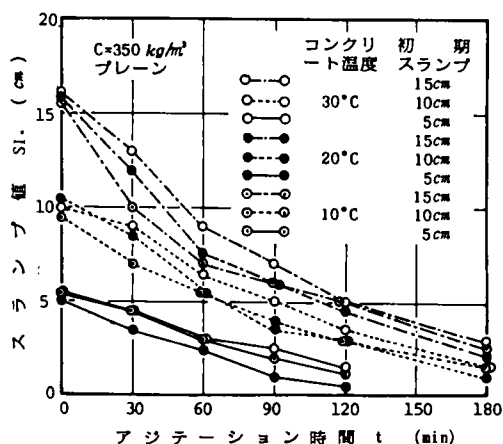


図5.3 アジテーション時間とスランプ値との関係  
(単位セメント量350kg/m<sup>3</sup>, プレーン)

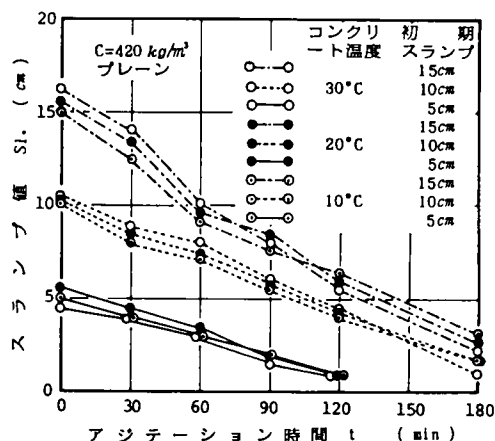


図5.4 アジテーション時間とスランプ値との関係  
(単位セメント量420kg/m<sup>3</sup>, プレーン)

向を示している。しかし、その低下の程度は従来の結果より大となっている。

単位セメント量およびコンクリート温度の違いによる影響は大差なく、また一定の傾向を示していない。初期スランプ値が15cmでアジテーション時間が短い場合には、Previteの結果<sup>5-9)</sup>などとは逆に、コンクリート温度の低い方がわずかなではあるが、スランプの低下は大となっている。しかも単位セメント量の少ない方がこの傾向は大きい。この原因については、はっきりしないが、アジテーション時間によるスランプ値の低下も従来の結果<sup>5-8)</sup>に比較して大

きく、本実験で用いたアジテーションの方法は、実際のアジテータの中でのコンクリートの状況とコンクリート量、コンクリートの自由落下の存在などが異なっており、後述するように空気量が大きく減少し、これが違いを生じさせた理由の1つと考えられる。

また、初期スランプ値の違いによる影響は、図5.3および図5.4に示されているように単位セメント量の多少にかかわらず初期スランプ値の大きい方が、スランプの低下は大きくなっている。

### 5.3.3 プレーンコンクリートのアジテーション時間によるレオロジー定数の変化

単位セメント量を350 kg/m<sup>3</sup>とした配合のアジテーション時間によるレオロジー定数の変化を図5.5に示す。

この図に見られるようにアジテーション時間が長くなると、コンクリートをビンガム物体と仮定したときのレオロジー定数である降伏値および塑性粘度とも増加している。村田<sup>5-5)</sup>は、注水後の経過時間が30分程度までは降伏値は増加するが塑性粘度は変化せずほぼ一定であると述べているが、本実験の結果は図5.5に示されているように塑性粘度の方の増加割合が小さく降伏値の増加量の半分程度ではあるものの降伏値、塑性粘度ともに増加しており、30分程度でもわずかなではあるが塑性粘度は増大している。

この原因として、村田<sup>5-5)</sup>はレオロジー定数を測定するのに回転粘度計を用いており、試料に与える外乱は本実験で用いた平行板プラストメータよりも非常に大きく Czerninその他多くの研究者<sup>5-1,10-12)</sup>が述べているようにフレッシュモルタルあるいはコンクリートのチクソトロピー的性質によるものであると考えられる。本実験の結果の方が、村田<sup>5-5)</sup>の結果よりも塑性粘度の変化が大きいということも、測定時に与える外乱の大小から説明できる。したがって、経過時間によるコンクリートの塑性粘度の変化は、施工のときにコンクリートが受ける流動速度に応じた状況で測定しなければならないことになる。

初期スランプ値の大小の影響は、スランプ値の場合とは逆に同じアジテーション時間に対して、初期スランプ値の小さい方がレオロジー定数の変化は大きくなっており、スランプ値のみでは、フレッシュコンクリートのレオロジー的性質の変化を表せない

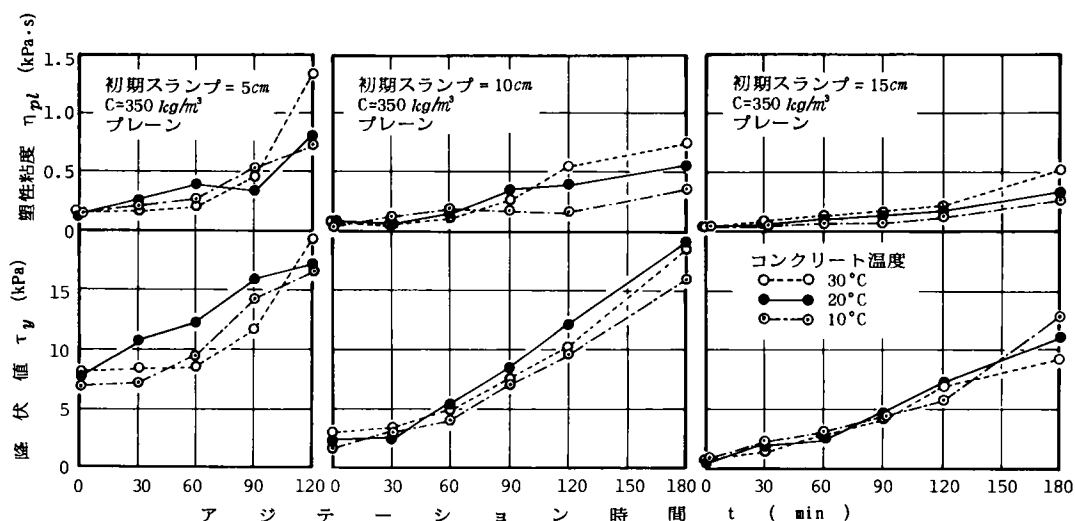


図5.5 アジテーション時間とレオロジー定数との関係（単位セメント量420kg/m³）

ということが示されている。

コンクリート温度の影響は、ばらつきがあり一定の傾向が示されていない。

また、単位セメント量を 420 kg/m³ と多くした場合は、図 5.6 に示すように単位セメント量以外の条件が同じ図 5.5 の中央の図とほぼ同じであり、この程度のセメント量の違いでは、差は示されていない。

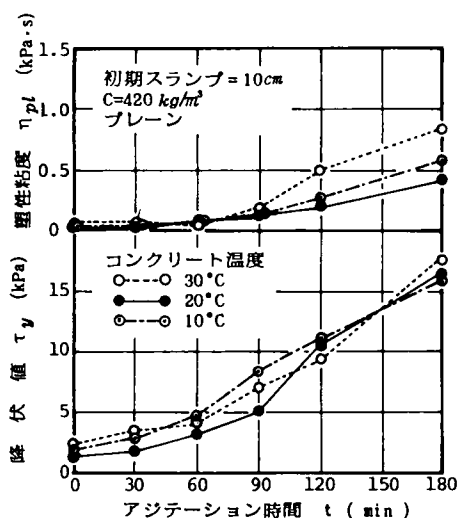


図5.6 アジテーション時間とレオロジー定数との関係（単位セメント量420kg/m³）

#### 5.3.4 混和剤を用いたコンクリートのアジテーション時間によるスランプ値の変化

現在の一般のコンクリートは、ほとんどの場合混和剤が使用されている。そこで、混和剤を用いたコンクリートのアジテーション時間による変化を調べ、ブレンコンクリートの結果と比較検討する。

混和剤を用いた初期スランプ値 10 cm のコンクリートのアジテーション時間によるスランプ値の変化は、図 5.7 に示すように図 5.3 のブレンコンクリートの場合よりも大きい。混和剤の種類によるスランプ値の変化の違いは、明確でなく一定の傾向は示されていない。

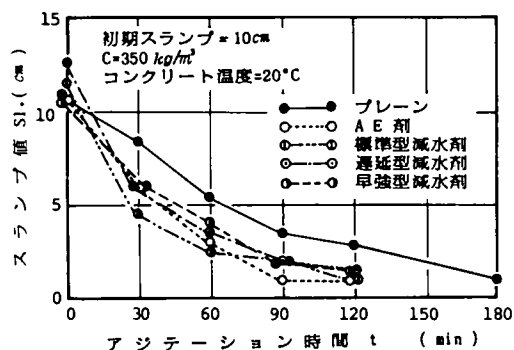


図5.7 混和剤を用いたコンクリートのアジテーション時間とスランプ値との関係（単位セメント量350kg/m³）

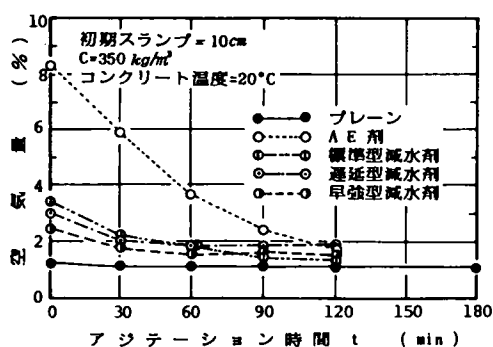


図5.8 混和剤を用いたコンクリートのアジテーション時間と空気量との関係（単位セメント量350kg/m³）

これらのコンクリートの空気量の変化は、図 5.8 に示すようであり、プレーンコンクリートの空気量はほとんど変化せず、空気を少ししか混入させない減水剤を用いたコンクリートではアジテーション時間が30分で1～1.5%の空気量が減少し、あとはほぼ一定で、スランプ値のこの30分間の大きな変化の傾向と一致している。とくにAE剤を用いたコンクリートでは、アジテーション時間とともに空気量が急激に減少している。これが混和剤を用いたコンクリートのスランプ値の変化が、プレーンコンクリートよりも大きい理由の1つと考えられる。

しかし、AE剤を用いたコンクリートでは、空気量のアジテーション120分による減少量6.5%に対するスランプ値の低下は9.7cmであり、空気量1%の変化に対する一般のコンクリートのスランプ値の変化量を2.5cmとすると、本実験のAEコンクリートの場合空気量の減少によるスランプ値の減少は計算上約16cmとなり、実験値の方が小さくなり、また空気量の変化の少ない減水剤を用いたコンクリートのスランプ値の低下と大差ない興味ある結果となっている。

### 5.3.5 混和剤を用いたコンクリートのアジテーション時間によるレオロジー定数の変化

混和剤を用いたコンクリートのアジテーション時間によるレオロジー定数の測定結果を図 5.9 に示す。

この図に見られるように、アジテーション時間が長くなるに従って降伏値および塑性粘度とも大きくなっており、スランプ値の場合と同様にプレーンコンクリートよりもその変化率は大となっている。このプレーンコンクリートよりも混和剤を用いたコン

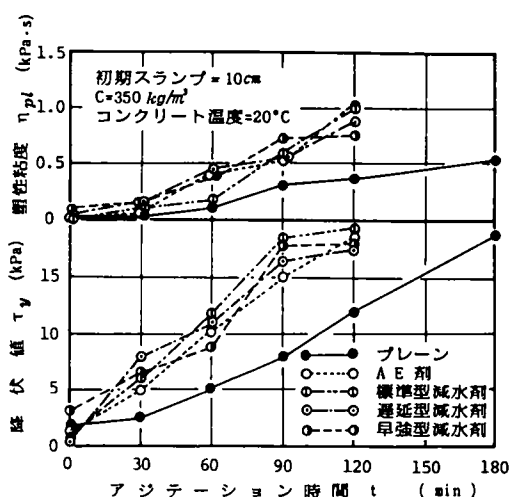


図5.9 混和剤を用いたコンクリートのアジテーション時間とレオロジー定数との関係

クリートの変化率が大きくなっている理由の1つとしては、前項で述べたように図 5.8 に示されている空気量の減少が混和剤を用いたコンクリートの方が大きくなっていることが考えられる。また、AEコンクリートのレオロジー定数の変化は前項のスランプ値の場合でも述べたように減水剤を用いたコンクリートの空気量の変化よりも非常に大きいにもかかわらず減水剤を用いたものと大差ないという興味ある結果になっている。

減水剤の型の違いによる影響は、一定の傾向が示されておらず、ブロッカーの貫入抵抗試験による結果<sup>5-13-19)</sup>の傾向とは一致していない。このように、混和剤を用いたコンクリートのブロッカー貫入抵抗値とレオロジー定数との間には、結果数が少なくはつきりしたことはいえないが、相関関係がない可能性もあるので、今後この点については更に検討が必要である。

以上述べてきたように、アジテーション時間によってレオロジー定数が変化し、時間とともに大きくなることが分ったが、その定量的な面については、従来のスランプ値の変化の程度<sup>5-2)</sup>と比較すると本実験のスランプ値の変化は大きく、アジテーションの方法に問題も考えられ実際のアジテータを使用して調査する必要がある。

### 5.3.6 アジテーションを行ったコンクリートの降伏値と塑性粘度との関係

アジテーションを行っていない練り混ぜ直後のプ

レーンコンクリートのレオロジー定数間には、第4章4.4.3(7)で述べたようにかなりの相関関係がある。アジテーションを行ったコンクリートの塑性粘度と降伏値との関係をプロットすると図5.10のようになる。

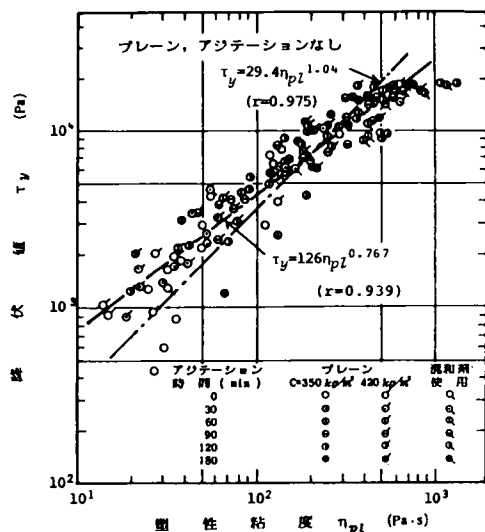


図5.10 アジテーションを行ったコンクリートの塑性粘度と降伏値との関係

この図に見られるように、アジテーション時間、混和剤の使用の有無、コンクリート温度、単位セメント量に関係なく、塑性粘度と降伏値の間には、比較的高い相関関係があり、アジテーションを行っていないブレンコンクリートと同様の結果となっている。

しかし、その関係式は、図5.10に示すように若干その傾きが異なっており、アジテーションを行った場合の関係式の勾配が小さい。測定点数は少ないが、本節のアジテーションをしていないすなわちアジテーション時間0分の場合には、アジテーションなしの式によく乗っているようである。

これは、前述したようにアジテーションによって降伏値の変化する量の約半分しか塑性粘度は増大しておらず当然の結果といえる。

また、本節の実験結果では、同じ塑性粘度に対する降伏値の最大値と最小値との違いは、2倍程度であり、この違いが実際の施工においては、どの程度の意味を持つかは不明である。

## 5.4 スランプロス低減剤を用いたコンクリートに関する実験結果およびその考察

### 5.4.1 はじめに

本節では、スランプロスを低減させる効果のある混和剤を用いたコンクリートのレオロジー定数のアジテーション時間による変化について調べ、スランプロス低減剤のレオロジー的性質に及ぼす性能について検討した実験シリーズIIの結果について述べる。

実験において、環境要因の1つとしたコンクリート温度は、アジテーション時間が長くなった試料において目的とした温度の+2℃を若干超えたものが2例あるだけでほとんどのものは、目的とした温度の±1℃の範囲にはいっており、温度の違いによる影響はわずかと考えられるので、考察においてはこの温度差による影響は無視する。

各配合の初期スランプ値は、17.3～18.9 cmの範囲にあり目的とした18 cmの±1 cmの間にあるので、スランプ値の変化は、初期スランプ値すなわちアジテーション時間t=0分のスランプ値に対する各測定時のスランプ値の比で示すこととする。

また、アジテーションによるレオロジー定数および空気量の変化についてもスランプ値と同様に練り混ぜ直後の値に対する比で整理し考察する。

### 5.4.2 アジテーション時間とスランプ値との関係

スランプロス低減剤を用いたコンクリートのアジテーション時間によるスランプ値の変化を図5.11に示す。

この図に見られるように、スランプロス低減剤を用いることによってスランプロスは小さくなっており、スランプロス低減剤の使用量が多いほど、スランプロスは小くなっており、この剤がスランプロスを低減させる効果があることが示されている。

単位セメント量が350 kgの場合、スランプの低下割合はアジテーション時間が短い時には、コンクリート温度の高い方がわずかではあるが小さくなっており、従来の結果<sup>5-2)</sup>と逆の傾向を示している。アジテーション時間が60分以上では、温度差による影響はほとんど見られない。この原因としては、図5.12に示すように、空気量の減少の割合がコンクリート

温度の高い方がアジテーション時間 30 分では空気量比にして 0.05~0.10 位小さく、空気量で 0.35~0.70 %程度少ないことが考えられる。この空気量の減少はスランプ値にして 0.7~1.4 cm 位影響することになるが、図 5.11 の実験結果ではもっと大きな差がある。したがって、この空気量の減少の割合が小さいことも 1 つの原因と考えられるが、スランプロス低減剤は、アジテーション時間が 30 分以内においてはコンクリート温度が高い場合に、より低減効果があることになる。

しかし、アジテーション時間が長くなると全体的には、わずかではあるがコンクリート温度の低い方がスランプ値の低下は小さくなっている。

単位セメント量の違いによる影響は、コンクリート温度が 20°C でスランプロス低減剤を用いない場合には、図 5.11 に示されているように単位セメント量の多い方が、スランプロスは大きくなっている。一方、スランプロス低減剤を用いた場合は、単位セメント量 500 kg/m<sup>3</sup> の方が 350 kg/m<sup>3</sup> の場合よりも、低減剤の使用量の違いによる効果が大きく示されている。

このように、スランプロス低減剤は、富配合で低減剤の使用量の多いほど低減効果が大きく、アジテーション時間が短い 30 分以内では、温度の高い方が低減効果が大きい。しかし、アジテーション時間が長くなると、コンクリート温度の低い方が、スランプ低下は小となっている。

#### 5.4.3 アジテーション時間とレオロジー定数との関係

アジテーションを行ったコンクリートのレオロジー一定数の変化を、スランプ値の場合と同様に比で図 5.13 に示す。

コンクリート温度がレオロジー定数に及ぼす影響は、アジテーション時間が短い 30 分以内ではほとんど差がなく、アジテーション時間が長くなると、温度の高い方がレオロジー定数の変化は大きく、従来のスランプ値の結果<sup>5-2)</sup>と同様の傾向を示している。

降伏値と塑性粘度のアジテーション時間による変化率は、降伏値の方が大きく、塑性粘度の約 1.5~2.0 倍となっており、本章 5.3.3 および 5.3.5 と同様の結果であり、コンクリートのチクソトロピーによ

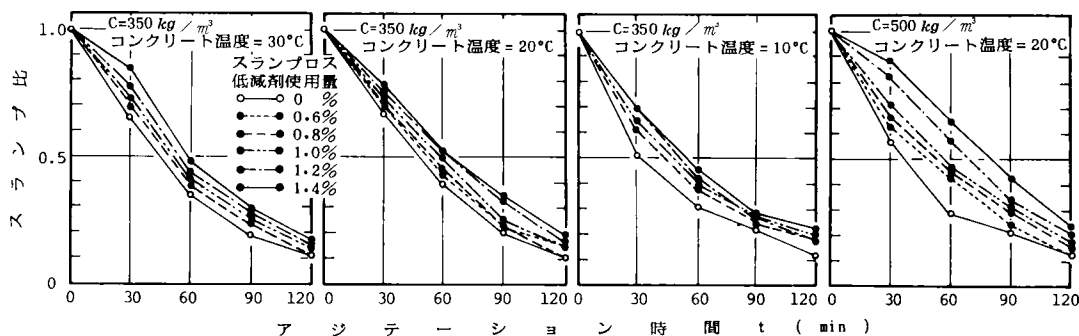


図5.11 アジテーション時間とスランプ比との関係

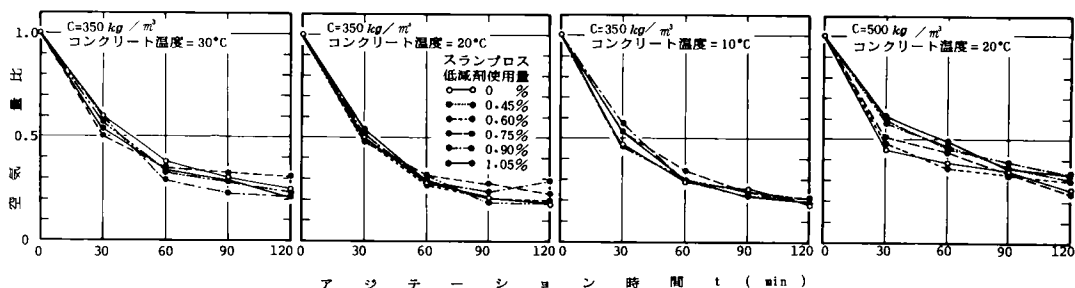


図5.12 アジテーション時間と空気量との関係

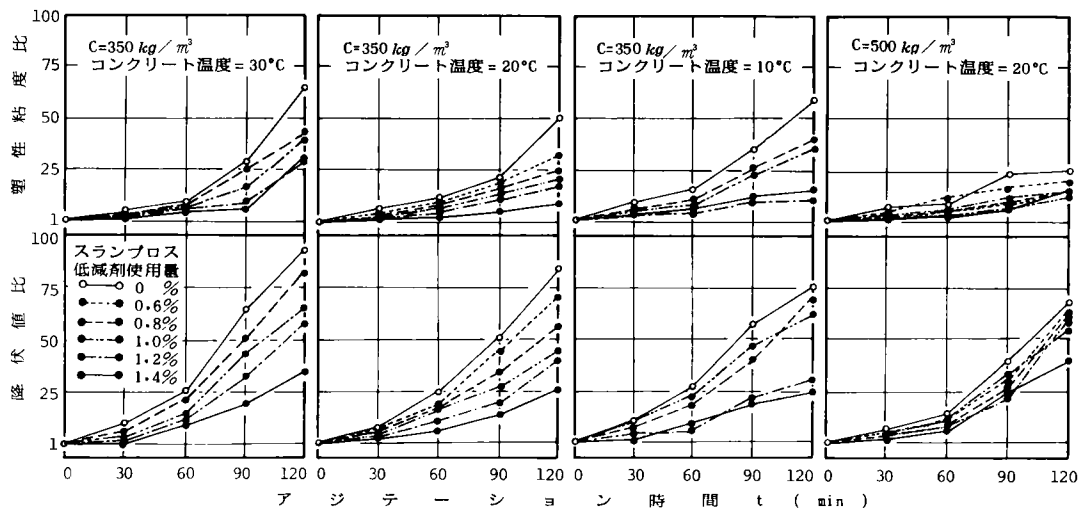


図5.13 アジテーション時間とレオロジー定数との関係

るものと考えられる。本章5.3.6の結果と同様に、アジテーションを行ったコンクリートの降伏値と塑性粘度との関係は、アジテーションをしていない練り混ぜ直後のレオロジー定数との関係式とは異なることが示されている。

したがって、練り混ぜ直後およびアジテーションを行った後のフレッシュコンクリートの性質を1つの指標で表すことはできないことになる。

スランプロス低減剤の使用量の違いによる影響は、降伏値の方に当然大きく表れ、使用量の多いほどアジテーション時間による変化が小さく、この剤の効果を示されている。

単位セメント量の違いによる影響は、図5.13に見られるように、単位セメント量の多い方が、レオロジー定数のアジテーション時間による増加量は少なく、富配合においてスランプロス低減剤の効果が大きいことを示している。しかし、その使用量の違いによる影響は、単位セメント量350 kgの場合より小さくなっている。とくに、塑性粘度の増加が小さくなっているのは、コンクリートのチクソトロピー的性質が富配合ほど大きいためとも推測できる。

このように、スランプロス低減剤は、使用量が多いほどアジテーション時間によるレオロジー定数の変化を小さくし、その変化量は塑性粘度の方が降伏値よりも小さい。また、この剤は富配合において効果が大きく、コンクリート温度の低い方がわずか

ではあるが、レオロジー定数の変化は小となっている。

降伏値と塑性粘度のアジテーションによる変化率が異なることは、アジテーションを行わないプレーンコンクリートの場合のように、降伏値か塑性粘度のどちらか一つの値でもう一方の大きさを推定することができないことになる。

## 5.5 結 語

コンクリートは、練り混ぜられた後時間とともにその性質が変化することは良く知られており、施工条件によって要求される適切な性質を持ったコンクリートを製造、供給するためには、この経過時間による性質変化をレオロジー的に調べる必要がある。

本章では、初期スランプ値、単位セメント量、コンクリート温度、混和剤の種類および使用量などを変え、トラックアジテータによる運搬時間をシミュレートした改造小型ミキサによるアジテーション時間がビンガム物体と仮定したフレッシュコンクリートのレオロジー定数すなわち降伏値および塑性粘度およびスランプ値に及ぼす影響について検討した。

その主な結果を要約すると以下のとおりである。

(1) アジテーション時間とともにスランプ値は、すべての配合とも低下し、従来の研究結果と同様の傾向を示している。しかし、その低下の大きさは、



従来の結果よりも大きくなっている。

(2) 単位セメント量が 350 kg と 420 kg の配合で、コンクリート温度を 10~30℃ に変えても、アジテーション時間によるスランプ値の低下の傾向は大きな結果となっている。

(3) 初期スランプ値の大きいコンクリートの方が、同じアジテーション時間に対するスランプ値の低下量は、大となっている。

(4) レオロジー定数は、アジテーション時間とともに増大しているが、降伏値と塑性粘度との増加の割合は異なり、塑性粘度は降伏値の約半分となっている。これは、フレッシュコンクリートの主としてチクソトロピーによるものと考えられる。

(5) プレーンコンクリートのアジテーション時間によるレオロジー定数の変化も、コンクリート温度の違いによる影響はほとんどないが、アジテーション時間が長くなると、温度の高い方がわずかではあるがレオロジー定数は大きくなっているものが多い。

(6) 混和剤を用いたコンクリートのスランプ値およびレオロジー定数の変化量は、プレーンコンクリートよりも大きい。これは、全体的な傾向は、プレーンコンクリートと同様である。これは、空気量がプレーンコンクリートよりも減少する量が多いことが 1 つの理由と考えられる。しかし、AE コンクリートでは、空気量の変化に見合うほどのスランプ値の低下を示していない。また、減水剤の型の違いによる影響は、ほとんど示されていない。

(7) スランプロス低減剤を用いたコンクリートにおいて、その使用量がセメント質量の 0.6~1.4 % の範囲では、量が多いほどスランプ値の低下が少なく、レオロジー定数の増加が小となっている。

(8) スランプロス低減剤は、富配合でコンクリート温度の高い配合において、より有効にスランプロスを低減させている。

(9) アジテーションしたコンクリートのレオロジー定数相互には、かなり高い相関関係があるが、練り混ぜ直後のレオロジー定数相互の関係式とは傾きが異なり、アジテーションをしないプレーンコンクリートの場合と同じ式では、レオロジー定数のどちらか 1 つの値でもう 1 つの値を推定することはできない。また、相関関係におけるばらつきも大きい。

アジテーションをしたコンクリートのレオロジー定数相互の関係式の傾きが異なることは、前述の(5)

で述べた塑性粘度の増加が降伏値の増加よりも小さいことから説明できる。

以上述べてきた結果は、実験室でトラックアジテータによるアジテーションをシミュレートする装置として改造小型ミキサを用いたものであって、実際のアジテータ内のコンクリートの状態と一部異なっていたことが考えられる。したがって、本実験による結果は、定性的な資料としては有効であるが、定量的な資料とするためには、実際のトラックアジテータを用いた測定が必要であろう。

## 参考文献

- 5-1) Czernin, W ; 建設技術者のためのセメント・コンクリート化学, 技報堂出版, 1969, pp. 53-54.
- 5-2) たとえば, 近藤, 明石, 渡辺; コンクリートの輸送に関する研究, セメント技術年報, Vol. 9, 1955, pp. 417-421.
- 5-3) 池田, 溝口; レデーミクストコンクリートの季節による特性変化, セメント技術年報, Vol. 16, 1962, pp. 441-445.
- 5-4) ASTM C 403-70.
- 5-5) 村田; まだ固まらないコンクリートのレオロジー的性質の活用, セメントコンクリート, No.312, 1973, pp. 16-23.
- 5-6) 土木学会; 昭和 49 年制定コンクリート標準示方書, 昭和 55 年版, pp. 262-266.
- 5-7) 日本建築学会; 建築工事標準仕様書・同解説, JASS 5 鉄筋コンクリート工事, 1979, pp. 315-321.
- 5-8) 土岐; 暑中コンクリートの強度上の特質とセメントの問題点, コンクリートジャーナル, Vol. 4, No. 6, 1966, pp. 31-39.
- 5-9) Previte, R.W. ; Concrete Slump Loss, Jour. of ACI, Vol. 74, 1977, pp. 361-367.
- 5-10) Tattersall, G.H. ; The rheology of Portland cement paste, British Jour. of Appl. Physics, Vol. 6, 1955, pp. 165-167.
- 5-11) Powers, T.C. ; Physical Properties of Cement Paste, Proc. of 4th Sympo. Chemi. Cement, Washington, 1960, pp. 577-613.
- 5-12) Nessim, A.A. and R.L. Wajda ; The rheology of cement pastes and fresh mortars, Mag. of

- Conc. Research, Vol. 17, No.51, 1965, pp. 59—68.
- 5-13) 明石；コンクリート用化学混和剤，朝倉書店，1972，p. 96.
- 5-14) 村田；各種減水剤の使用方法の研究，セメント技術年報，Vol. 20, 1966, pp. 260—263.
- 5-15) 武田；暑中コンクリートに関する実験，セメント技術年報，Vol. 17, 1963, pp. 359—365.
- 5-16) 土岐，加藤，小林，西村；コンクリートの凝結遅延剤について，セメント技術年報，Vol. 19, 1965, pp. 306—309.
- 5-17) 中島，岡部；セメントの相違が分散剤の性能におよぼす影響について，セメント技術年報，Vol. 20, 1966, pp. 264—268.
- 5-18) 岡田，西林；減水剤を用いたコンクリートの減水と強度に関する研究，材料，Vol. 16, 1967, pp. 642—649.
- 5-19) 西林；減水剤を用いたコンクリートの諸性質に関する研究，材料，Vol. 18, 1969, pp. 434—441.

## 第6章 スランプ試験に関するレオロジー的検討

### 6.1 概 説

フレッシュコンクリート自身の性質を表す方法として、コンクリートをビンガム物体と仮定し、そのレオロジー定数で表現することについては、コンクリートをビンガム物体と仮定できそのレオロジー定数を測定できることをすでに第3章で述べた。コンクリートは、工場など限られた場所でも設備が整えられている所だけでなく、コンクリート構造物を建造する各工事現場で使用され、それぞれの場所においてフレッシュコンクリートの性質を測定する必要がある。

ところが、第3章で詳しく述べたようにフレッシュコンクリートのレオロジー定数の測定方法は、どの方法も比較的複雑であり、装置も大型であってコンクリートの工事現場での測定には適さない。したがって、フレッシュコンクリートのレオロジー的性質を現場で測定するためには、工事現場でも使用できるレオロジー定数の簡便な測定方法が必要となる。

このためには、次の3つの方法が考えられる。1つは、レオロジー定数測定装置としてすでに開発されているものを改良し、現場でも使用できるようにするか、全く新しい現場に適する測定装置を開発するかである。2つめは、レオロジー量の絶対値を測定しないものであっても、そのレオロジー的意味を持つ値を求められる装置を開発するかであり、3つめとしては、現在すでに開発されているコンクリート用の各種コンシステンシーあるいはワーカビリティ試験法について、レオロジー的意味づけをするかである。

第1のフレッシュコンクリート用の工事現場でも使用できるレオロジー測定装置等を開発することは、コンクリートを均一材料と見なし得るだけの装置寸法を持ったものにするために大型化<sup>6-11)</sup>が避けられず、またコンクリートの材料分離に起因する困

難<sup>6-2,3)</sup>があり、現状では非常に難しい。

第2のレオロジー定数に関連した指標を求める方法としては、TattersallのTwo-point Test<sup>6-4-6)</sup>がある。この方法は、材料分離によるすべり層の影響をなくすることができると考えられるミキサの回転数とそのとき羽根に作用するトルクとの関係から、ビンガム物体と仮定したフレッシュコンクリートのレオロジー定数にそれぞれ関連する2つの物性定数を求めるものであり、1つの有力な方法であろう。

第3の現在使用されているコンシステンシーあるいはワーカビリティ試験法のレオロジー的意味づけを行うには多くの試験法が対象になると考えられる。比較的静的な試験法としてはスランプ試験、動的なものとしてはフロー試験やVB試験がその代表であろう。

VB試験については、振動によってフレッシュコンクリートの各粒子間の距離が離れその結合力が低下してコンクリートが流動するので、村田ら<sup>6-7)</sup>も指摘しているように主としてビンガム物体の塑性粘度に関連する指標になるのではないかとすることで検討してみたが、高い相関関係は得られなかった。この理由として、VB試験ではスランプしたあとのコンクリートが水平になるまでに必要な仕事量を測定するものであって、スランプした形から水平までの変形量が、スランプの大きさによって変化することすなわち最初の形が一定となっていないことや振動エネルギーの伝達がコンクリートのコンシステンシーの大小によって異なることなどによるものと考えられる。また、Mayer<sup>6-8)</sup>のようにその沈下曲線の形を詳しく調べることも1つの方法と考えられるが、現場向でない。フロー試験もモルタルに対しては現場での使用が可能であるが、コンクリート用は装置が大型となり現場での使用は困難である。

村田ら<sup>6-10-12)</sup>は、スランプコーンを取り除いたあとのフレッシュコンクリートの自重による最大せん断応力度が変形によって減少し、ビンガム物体の降

伏値に達したとき変形は停止するとした研究を報告しているが、応力度の作用方向、境界条件などに問題があると考えられる。

そこで、現在最もよく使用され簡便でもあるスランプ試験のレオロジー的意義について検討することとする。

フレッシュコンクリートをビンガム物体と仮定すると、スランプしたあとのコンクリートの内部に発生しているせん断応力度がある限界値をこえると、コンクリートはさらに変形（流動）することになる。スランプしたあとで工学的には静止しているとするならば、コンクリートは、弾性的につり合っていることになり、内部に発生している最大せん断応力度は、降伏値と深い関連がある<sup>6-9)</sup>と考えられる。

また、降伏値以下におけるフレッシュコンクリートの弾性的性質については解明されていないが、スランプしたコンクリートが静止してある形を保っているとする、第1次近似としては、線形弾性体と仮定できると考えられる。

本研究では、スランプしたコンクリートの内部に発生しているせん断応力度は、有限要素法を用いて求めることとし、まず解析に必要なフレッシュコンクリートおよびスランプ試験に関する基礎的なデータを得るため、スランプしたコンクリートの形状、コンクリートの単位容積質量などについて実験的に調査する。そして、スランプしたコンクリートのせん断応力度を要素分割数、ポアソン比を変えて有限要素法で求め、降伏値の実測値と比較しスランプ試験のレオロジー的意義について検討する。

## 6.2 実験によるスランプ試験の検討

### 6.2.1 まえがき

前節で述べたようにスランプ試験の持つレオロジー的意義を有限要素法を用いて検討するためには、スランプしたコンクリートの形状、単位容積質量、ヤング係数、ポアソン比などが必要である。

これらの性質は、コンクリートの配合、使用材料、経過時間などによって影響されるが、本節では、練り混ぜ直後のみを対象とする。

また、ヤング係数は、フレッシュコンクリートを線形弾性体と仮定した本解析においては2回逆の変換に使用され、値そのものは不明であってもよい。

ポアソン比は、測定することが非常に困難であり、6.3.3(2)で述べるように大体推定できるので、ここでは、配合要因とそれに関連するスランプ値によるスランプしたコンクリートの形状の違い、単位容積質量を実験的に求め、次節の解析に必要な基礎データとする。

実験は、第4章4.4のシリーズIと同時に行った。

### 6.2.2 実験の方法

#### (1) 使用材料

セメントは、比重3.16、ブレン値3120 cm<sup>2</sup>/g、フロー値250の普通ポルトランドセメントを用いた。

細骨材は、表6.1および図6.1に示す徳島県吉野川産の粗粒率(F.M.)2.76の川砂を表面乾燥飽水状態に近い空气中乾燥状態にして貯蔵し、使用直前に含水率を測定して有効吸水量を補正して使用した。

粗骨材は、鳴門市大麻町産の硬質砂岩碎石および

表6.1 使用骨材の物理的性質

	細骨材	粗骨材	
		砕石	川砂
比 重	2.62	2.61	2.68
吸 水 率 (%)	1.50	1.70	1.16
単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	1720	5-10mm 1420 5-15mm 1480 10-15mm 1480	5-15mm 1630
空 隙 率 (%)	34.4	5-10mm 54.6 5-15mm 56.6 10-15mm 56.6	5-15mm 39.1
粗 粒 率 (F. M.)	2.76	5-10mm 7.00 5-15mm 6.43 10-15mm 6.00	5-15mm 6.42

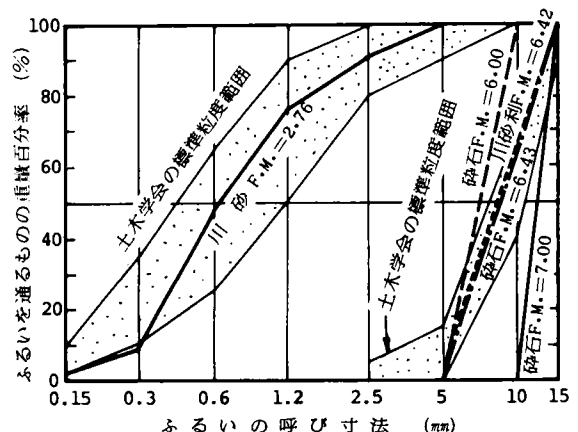


図6.1 骨材の粒度曲線

徳島県吉野川産の川砂利とを用いた。粗骨材の粒度としては、碎石では、5～10 mm、10～15 mmおよび5～15 mmの3種、川砂利では5～15 mmの1種とした。これらの物理的性質および粒度曲線をそれぞれ表6.1および図6.1に示す。なお、碎石は5～10 mm、10～13 mmおよび13～15 mmにふるい分けて表面乾燥飽水状態で貯蔵し、粒度10～15 mmでは質量比で10～13 mm：13～15 mm＝1：1、粒度5～15 mmでは5～10 mm：10～13 mm：13～15 mm＝6：2：2に再混合して使用した。

### (2) コンクリートの配合

測定したコンクリートの配合は、表6.2に示す。配合要因は、すべて体積濃度で表し、セメントペースト中のセメントの体積濃度 $v_c$ すなわち水セメント比W/C、モルタル中の細骨材の体積濃度 $v_s$ およびコンクリート中の粗骨材の体積濃度 $v_g$ を用い、配合要因によってスランプ値を変化させ、スランプしたコンクリートの形状を調べ、コンクリートの単位容積質量を求めるため表6.2に示す36種の組合せとした。粗骨材の粒度がこれらの性質に及ぼす影響についても検討するため、粗骨材の粒度は、スランプ値が1 cm以下および21 cmを大きく越える場合を除いて、碎石では5～10、10～15 および5～15 mmとし、川砂利では5～15 mmと各配合において変え、計98種の配合とした。

### (3) コンクリートの練り混ぜ

コンクリートの練り混ぜには、容量50 lの強制練

りミキサを用い、細骨材、セメント、粗骨材の順に投入し、練り混ぜながら水を加え、全材料投入後3分間で試料35 lを練り混ぜた。なお、コンクリートの温度による性質の変化を防ぐため、練り混ぜ水の温度を20～45℃に変えて試料の練り上がり温度を20±2℃になるようにした。

### (4) スランプ値およびスランプしたコンクリートの形状の測定

フレッシュモルタルおよびコンクリートのスランプ試験は、JIS A 1101-75の方法に従って、練り混ぜ後練り板上に排出した試料を2往復切返し後すぐに行った。スランプしたコンクリートの形状は、スランプ値を測定した直後にスケールとともにコンクリートとはほぼ同じ高さから写真撮影し、同時に写したスケールを用いて現像焼付を行った写真の実測値を補正して求めた(6.2.3(1)参照)。スランプ試験は、同一バッチについて2個同時に行った。

また、スランプコーンを除去した直後のコンクリートの流動状態を目視で観察した。

### (5) フレッシュコンクリートの単位容積質量の測定

スランプコーンを取り除いた後コンクリートに作用する自重を求めるため、スランプしたフレッシュコンクリートの単位容積質量を測定した。スランプしたコンクリートを底板ごと質量を測定し、底板の質量を差引いてスランプコーンの中に詰め込まれたコンクリートの質量を測定した。単位容積質量は、

表6.2 測定したコンクリートの配合

$v_g$ (S/C) $v_s$ (S/C) $v_g$ (S/a%)	$v_g$ (W/C)						
	0.500 (0.32)	0.475 (0.35)	0.450 (0.39)	0.425 (0.43)	0.400 (0.48)	0.375 (0.53)	0.350 (0.59)
	(1.7)	(1.7)	(1.8)	0.50 (1.9)	(2.1)	(2.2)	(2.4)
0.00 (100)	○	○	○				
0.05 (90)	○	○	○				
0.10 (82)	○	○	○	○			
0.15 (74)	○	○	○	○			
0.20 (67)		○	○	○	○		
0.25 (60)		○	○	○	○		
0.30 (54)		○	○	○	○	○	
0.35 (48)			○	○	○	○	○
0.40 (43)				○	○	○	○

注) ○印は測定した配合を示す。

粗骨材粒度は、碎石で5～10mm、10～15mm、5～15mm、川砂利で、5～15mmとした。

スランブコーンの寸法を実測し、内容積を 5543 cm<sup>3</sup>として、前述の質量とから計算で求めた。

なお、すべての測定は、日を変えて 2 回行い、その平均値を各測定値とした。

### 6.2.3 実験結果およびその考察

#### (1) スランブ試験におけるコンクリートの流動状況

JIS A1101の方法に従ってスランブコーンにコンクリートを詰め、コーンを引き上げたときのコンクリートの流動状況を観察すると、スランブ値の大小によってその状況は異なっている。スランブした後のコンクリートの状態の 1 例を図 6.2 に示す。

スランブコーンに詰め込んだコンクリートの体積は一定であり、フレッシュコンクリートの変形による体積変化はわずかであると考えられ無視できるから、スランブして高さが低くなったコンクリートの底面積は大きくなる。この底面の拡がり方は、スランブ値の大きさによって異なっている。

スランブ値が数 cm 程度までは、コンクリート全体が低くなり底面部分のコンクリートが横方向に数 mm 程度拡がるが、スランブ値が 10 cm 程度より大きくなると、底面が横方向に拡がるよりも上部のコンクリートが周辺から下方に流れ落ちてくる。この流れ落ちる現象は、スランブ値がさらに大きくなればよく観察される。

図 6.2 (d) に最もよく示されているようにスランブ値が 5 ～ 20 cm の場合には、スランブしたコンクリートの頂面は、すりばち状に中央部がへこみ、中央部のコンクリートが円周方向へも流動していることが観察される。

村田ら<sup>6-11,12)</sup>は、コンクリートがスランブする場合、図 6.4 に示すように  $dx$  の厚さの薄いコンクリートの円板要素がコーンを取り去ることによって更に薄くなり  $dx_0$  の厚さになり、その面積も拡がるとしているが、以上述べたように本実験の観察結果では、スランブ値の小さい場合はこのような近似が成立するようであるが、スランブ値が 10 cm 以上になるとこの村田らの考え方は不適当と考えられる。

スランブしたコンクリートの外縁の形は、図 6.2 に示したように変曲点を持つ曲線となっている。スランブ値が約 10 cm までは、頂部の形はスランブコーンの形に似ており、スランブ値が大きくなるに従ってこの形は崩れている。スランブ値が大きくなると

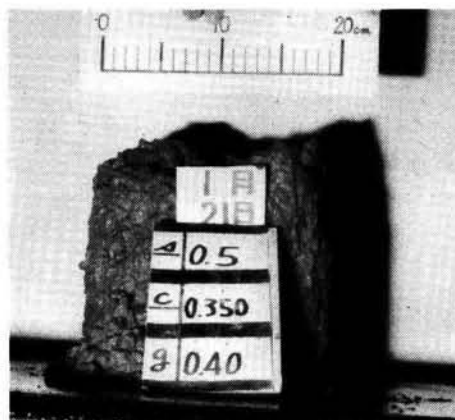


図 6.3 粗骨材の多い場合のスランブしたコンクリートの形状 (SI=10.4 cm)

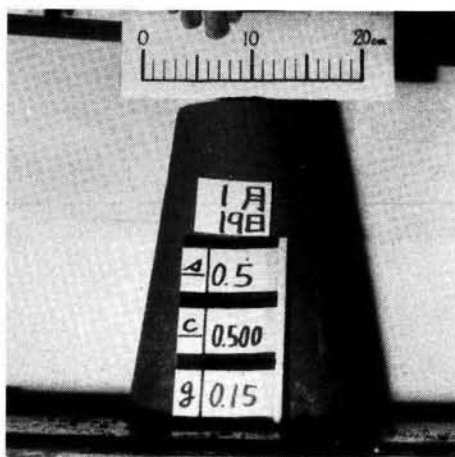


図 6.4 村田らによるスランブ試験の円板要素の変形<sup>6-11)</sup>

図 6.2 の(b)～(e)に見られるように底板より 4 ～ 8 cm のところがふくらみ、極端なものになると底板より 1 ～ 2 cm の高さのコンクリートがオーバーハングしている。しかし、スランブ値が 20 cm 以上になると全体的に拡がり、図 6.2 (f) のようになっている。

また、図 6.3 に示すように粗骨材の最大寸法 15 mm、細骨材率 43 %、水セメント比 0.59 の荒荒しいコンクリートでは、図 6.2 (c) と同じスランブ値でも形状の異なるものがある。このことは、スランブ値のみでフレッシュコンクリートの性質を表すことができない場合があることを示すとともに、スランブするときのコンクリートの流動状態が、前述したものと相違する場合があることを表している。

しかし、一般的な配合のコンクリートの場合には、図 6.2 に示すような形状をしており、スランブコーンを取り除いたときの流動は、スランブ値数～10 cm を境にして若干異なるものの、それぞれの領域においてほぼ同じと考えられる。したがって、一般の配合のコンクリートでは、スランブ値の大きさによってスランブした後のコンクリートの形状はそれぞれ



(a) Sl. = 1.0 cm



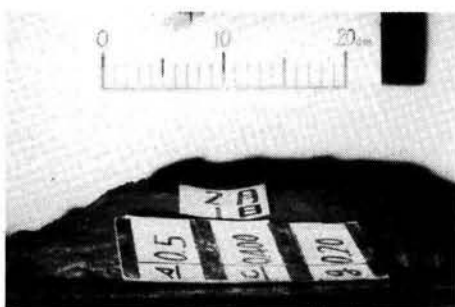
(b) Sl. = 5.2 cm



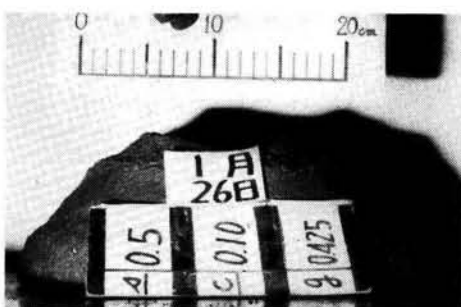
(c) Sl. = 9.9 cm



(d) Sl. = 15.2 cm



(e) Sl. = 20.3 cm



(f) Sl. = 25.1 cm

図6.2 スランプしたコンクリートの形状

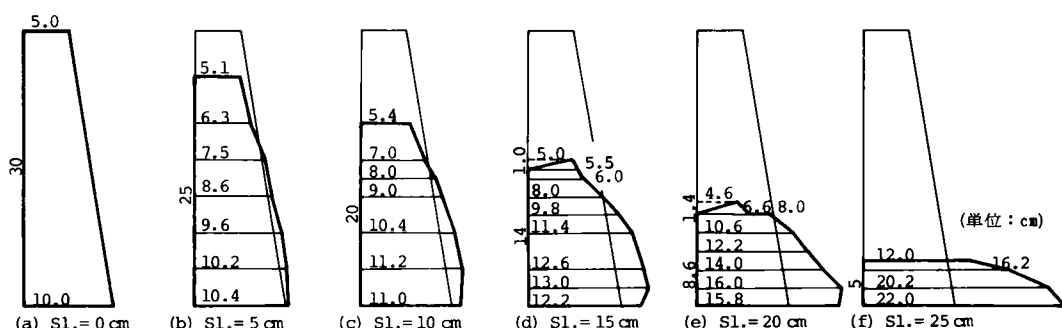


図6.5 スランプしたコンクリートの形状のスランプ値別のモデル化

同一と仮定できる。

## (2) スランプしたコンクリートの形状のモデル化

有限要素法を用いてスランプしたコンクリートの内部に発生している最大せん断応力度を求めるためには、まずスランプしたコンクリートの形状を決めることが必要である。

スランプしたコンクリートの形状は、6.2.1(4)で述べたようにして図6.2に見られるような写真を撮影し、実寸法の約 $\frac{1}{2}$ に焼付したのから各部の寸法を読み取り代表的な形状を次のようにして決定した。

前述したように、スランプしたコンクリートの形状は配合とか骨材の種類によってたとえば図6.3に見られるような例外はあるが、一般的な配合ではスランプ値によってほぼ同様の形と考えられるので、スランプ値が0, 5, 10, 15, 20 および 25 cmの $\pm 2$  cmの範囲のスランプしたコンクリートの形状を少なくともそれぞれ4個測定し、比較検討してモデル化を行った。このとき、スランプしたコンクリートの

体積がスランプコーンの容積 5498  $\text{cm}^3$  になるようにした。しかし、数字の丸め方によって最大1%の体積の誤差を生じている。

スランプ値0, 5, 10, 15, 20 および 25 cmのモデル化を行った結果を図6.5に示す。

## (3) フレッシュコンクリートの単位容積質量

コンクリートの示方配合から求まる理論単位容積質量およびスランプ試験を行ったコンクリートの質量を測定して求めた実測単位容積質量をそれぞれ表6.3および表6.4に示す。スランプ値と実測単位容積質量との関係を図6.6に示す。

表6.3および表6.4に示されているように、コンクリートの単位容積質量は、配合によって変化し、理論単位容積質量では最大0.1  $\text{t}/\text{m}^3$ の差があり、実測単位容積質量では、0.15  $\text{t}/\text{m}^3$ の開きがある。また、実測値は理論値の95~98%であり、そのほとんどのものは、2.25~2.31  $\text{t}/\text{m}^3$ の範囲にあり、平均的な値としては2.28  $\text{t}/\text{m}^3$ となっている。

表6.3 フレッシュコンクリートの理論単位容積質量 ( $\text{t}/\text{m}^3$ )

$\nu_g \backslash \nu_c$	0.500	0.475	0.450	0.425	0.400	0.375	0.350
	0.50						
0.00	2.35	2.32	2.30				
0.05	2.36	2.34	2.31				
0.10	2.37	2.35	2.33	2.30			
0.15	2.39	2.36	2.34	2.32	2.30		
0.20		2.38	2.36	2.34	2.31		
0.25		2.39	2.37	2.35	2.33		
0.30		2.41	2.39	2.37	2.35	2.33	
0.35			2.40	2.38	2.37	2.35	2.33
0.40				2.40	2.39	2.37	2.35



表 6.4 フレッシュコンクリートの実測単位容積質量 ( $t/m^3$ )

$v_c$ $v_g$	0.500	0.475	0.450	0.425	0.400	0.375	0.350
	0.50						
0.00	2.23 2.25	2.21 2.23	2.18 2.19				
0.05	2.24 2.28	2.22 2.27	2.20 2.23				
	2.28	2.25	2.21 2.24				
0.10	2.24 2.27	2.24 2.28	2.26 2.27	2.20 2.23			
	2.29	2.27	2.25 2.24	2.24			
0.15	2.28 2.31	2.27 2.29	2.25 2.27	2.23 2.26			
	2.32	2.30	2.28 2.26	2.26			
0.20		2.30 2.31	2.27 2.30	2.26 2.28	2.27 2.26		
		2.30	2.28	2.27			
0.25		2.31 2.30	2.30 2.29	2.28 2.30	2.29 2.28		
		2.32	2.31	2.29			
0.30		2.33	2.31 2.38 2.30	2.30 2.31 2.28	2.31 2.30	2.29 2.28	
			2.31 2.32	2.32			
0.35			2.35	2.31 2.28 2.31 2.32	2.31 2.22	2.30 2.31	2.31 2.31
0.40				2.31	2.34 2.34	2.33 2.33	2.33 2.32

注) 各欄の値は、上から砕石10~15mm、砕石5~10mm、砕石5~15mm、川砂利5~15mmを用いた配合の単位容積質量を示す。

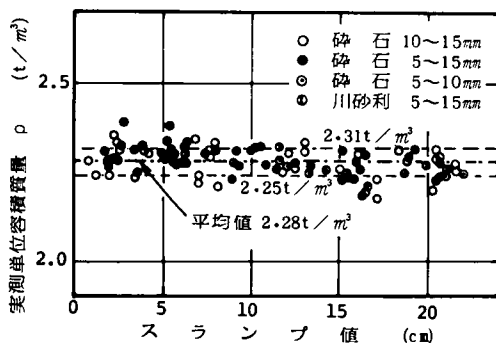


図6.6 スランプ値と実測単位容積質量との関係

図 6.6 に示されているように、スランプ値が大きくなると実測単位容積質量は、若干小さくなる傾向があるが、その差はわずかであり、平均値としては、 $2.28 t/m^3$ と考えてよい。

したがって、本実験に用いたコンクリートの実測単位容積質量は、配合、スランプ値などの相違によって若干異なるが、その差はわずかであり、平均値としては  $2.28 t/m^3$  が得られている。これは、表 6.1 に示すように骨材の比重に大きな相違がないことが一因であろう。

#### 6.2.4 まとめ

スランプしたコンクリートの形状は、本実験で用いたモルタルから粗骨材量を徐々に増加させた一般的な配合のコンクリートでは、骨材量の特に多い場合を除いてスランプ値が同じであれば、ほぼ同一の形と仮定でき、スランプ値別に図 6.5 とできる。

スランプコーンを取り除いたときのコンクリートの流動は、スランプ値の大きさによって異なり、スランプ値が 10 cm 程度以下であれば、コンクリート全

体がスランプするが、これより大きい軟らかいコンクリートでは、底面に近い円周部分のコンクリートが下方に流れ落ちるようである。

また、本実験で用いたコンクリートでは、粗骨材の比重に大差がないことにより、配合、スランプ値が異なってもその差は小さく、ほとんどのものが2.25~2.31 t/m<sup>3</sup>の範囲にあり、平均値として2.28 t/m<sup>3</sup>が得られている。

### 6.3 有限要素法によるスランプ試験の検討

#### 6.3.1 まえがき

スランプ試験において変形を起こさせる外力は、スランプコーンを引き抜いた瞬間に作用し、このときが最大で、コンクリートがスランプして変形して行くに従って小さくなり、変形に対する抵抗が外力と釣り合ったときに変形（流動）は停止する。

この停止の状態は、厳密にいえば完全に流動しているかないかは不明であるが、工学的には流動していないと考えられる。また、この場合の外力は比較的小さく、フレッシュコンクリートを構成する成分のうち少量含まれる空気を除くとすべて非圧縮性物体であるので、コンクリートは非圧縮性物体と仮定できる。すなわち、スランプ試験時の変形は、体積の変化を含まない「形」の変形であり、応力度としてはせん断応力度のみが関係することになる。

したがって、コンクリートがスランプし、その流動が停止したときコンクリートは弾性的に釣り合っているとすると、スランプしたコンクリートの内部に発生しているせん断応力度の最大値は、フレッシュコンクリートをビンガム物体と仮定すると、降伏値に等しいと考えられる。このせん断応力度の最大値は、スランプしたコンクリートの形状すなわちスランプ値と密接な関係があると思われる。

スランプ値と降伏値との関係について、1971年森永<sup>6-13)</sup>は実験的に降伏値は主としてスランプ値によって定まると報告しており、1974年著者ら<sup>6-9)</sup>は、スランプしたコンクリートの形を単純に仮定し有限要素法を用いてせん断応力度の最大値を求め、実測値と比較している。1975年村田ら<sup>6-10)</sup>は、スランプコーンを除いた後のフレッシュコンクリートの自重による最大せん断応力度が、図6.4に示す円板要素が

拡がりそのためにせん断応力度が減少し、ビンガム降伏値に達した時に変形は停止するとして、スランプ値と降伏値との関係を次の式で与えている。

$$Sl = H - (h_0 + h_1') \quad (6.1)$$

ただし、

$Sl$  ; スランプ値 (cm)

$H$  ; スランプコーンの高さ (cm)

$h_0$  ; スランプしたコンクリートのせん断応力が降伏値以下になる頂部からの高さ (cm)

$$h_1' = \int_0^{h_1} \frac{\tau_y + S_e}{\tau_y} d\xi = \frac{3}{\rho} \tau_y \ln \frac{3H^2}{(H + h_0)^3 - H^3} \quad (6.2)$$

$$\tau_y = \rho \frac{(H + h_0)^3 - H^3}{6(H + h_0)^2} \quad (6.3)$$

$\tau_y$  ; ビンガム降伏値 (g/cm<sup>2</sup>)

$\rho$  ; 密度 (g/cm<sup>3</sup>)

$S_e$  ; 図6.7に示す底面からの水平抵抗力

さらに、1976年村田ら<sup>6-11,12)</sup>は、コンクリートが硬くなると粉粒体効果があり、スランプ値10 cm程度以下のコンクリートに対しては、粉粒体効果を有するビンガム物体を考え、式(6.2)のかわりに、

$$h_1' = \Sigma [\Delta x' + (r' - r) \tan \phi] \quad (6.4)$$

ここで、

$$\Delta x' = \frac{r^2}{r'^2} \Delta x \quad (6.5)$$

$$r' = \sqrt{\frac{\tau}{2\tau_y}} r \quad (6.6)$$

$$\Delta x = \frac{H - h_0}{n} \quad (6.7)$$

$\phi$  ; 内部摩擦角

$r$  ; 考えている円盤要素の半径

$n$  ; 近似計算を行うときの区分数

$W_r$  ; 考えている円盤要素の垂直応力

$$\tau = \frac{W_r}{2\pi r^2} \quad (6.8)$$

を与えている。

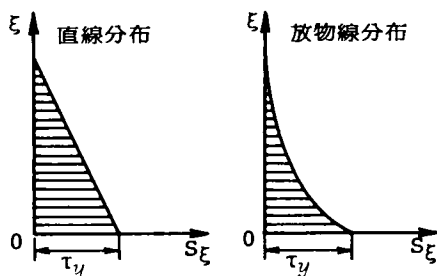


図6.7 村田らによる水平抵抗力の分布<sup>6-11)</sup>

以上の理論において、村田らは、スランプ試験に用いる底板によるコンクリートへの水平抵抗力の分布を図6.7に示すように仮定している。この図6.7の抵抗力の分布は、安定して釣り合ったときコンクリート内部では、降伏値を $\tau_y$ 、水平抵抗力を $S_\xi$ としたとき $\tau_y + S_\xi$ の大きさの応力が発生し、釣り合っているということであり、降伏値を超えると変形するという最初の条件と矛盾する。コンクリートに粒子が含まれるということによる影響を水平抵抗力 $S_\xi$ で表すことは1つの方法と考えられるが、以上の議論では根拠が明らかでなく水平抵抗力を考慮することは問題である。

そこで、本研究では、前節6.2で求めたスランプしたコンクリートの形状、単位容積質量を用いて有限要素法でスランプしたコンクリートの内部に発生している最大せん断応力度の分布を、要素分割の方法、ポアソン比、コンクリートの単位容積質量を変えて求め、解析方法について検討するとともに、降伏値と密接な関係があると考えられる最大せん断応力度の最大値をスランプ値別に求める。

### 6.3.2 有限要素法による解析方法

#### (1) スランプしたコンクリートモデルの要素分割

スランプしたコンクリートのスランプ値別の形状は6.2.3(2)で述べたように実験で求めた図6.5に示すものとした。

コンクリートを均質等方性材料と仮定し、スランプしたコンクリートのような軸対称物体を有限要素法で解析する場合には、図6.8および図6.9に示すようなリング要素を用いることができ、これは収束が早いという利点を有するので、本解析ではこのリング要素を用いた。なお、このリング要素は、図6.

8の三角形要素 $i-j-m$ を対称軸のまわりに回転させたときにできる回転体であり、図6.9に示すようなものである。

要素分割の形状、数などは、解析精度に影響を及ぼすので、これらの影響についてスランプ値0 cmお

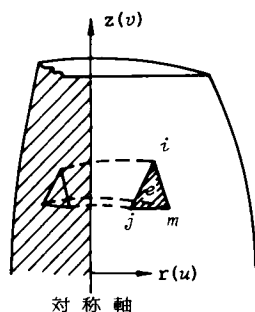


図6.8 軸対称物体内のリング要素

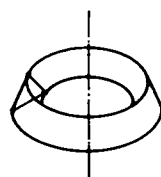


図6.9 リング要素

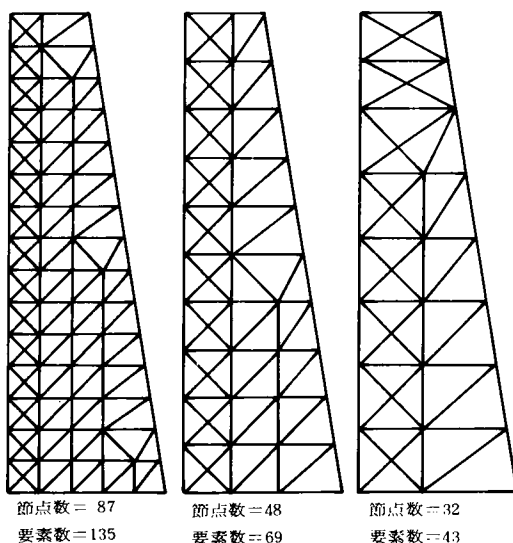


図6.10 要素分割方法 (スランプ値=0 cm)

表6.5 各スランブ値に対する解析条件

スランブ値 (cm)	コンクリートの 単位質量 (t／m³)	コンクリートの ヤング係数 (Pa)	コンクリートの ポアソン比	節 点 数	要 素 数	
0	2.20, 2.25, 2.28, 2.30, 2.35	100	0.45, 0.46, 0.47, 0.48, 0.49	32, 48, 87	43, 69, 135	
5	2.28		0.49	81	127	
10	2.20, 2.25, 2.28, 2.30, 2.35		0.45, 0.46, 0.47, 0.48, 0.49	28, 55, 70	39, 83, 109	
15	2.28		0.49	59	93	
20				50	76	
25				39	54	

よび 10 cm の場合についてそれぞれ 3 種類の要素分割について検討した。節点数および要素数は、表 6.5 に、スランブ値 0 cm の場合の要素分割の方法は、図 6.10 に示す。

この他のスランブ値の場合は、スランブ値 0 cm および 10 cm の要素分割数の影響の検討結果を参考にして、最大せん断応力度が最大となる中央下部での 1 つの要素の大きさが、表 6.5 および図 6.10 の要素数の一番多い場合とほぼ同じ、すなわち要素の長辺が 2 cm 程度になるように要素分割を行った。節点数および要素数は、表 6.5 に、要素分割の形状は、図 6.18～図 6.23 に示す。なお、これらの要素は、図 6.8 の三角形  $ijm$  に対応するものである。

## (2) 解析に用いたコンクリートの物性定数および境界条件

スランブしたコンクリートのせん断応力度を有限要素法を用いて求めるには、フレッシュコンクリートの物性定数として、単位容積質量、ヤング係数およびポアソン比が必要である。

コンクリートの単位容積質量は、スランブコーンを取り除いたときコンクリートに作用する外力としては自重のみであり、重要な物性定数である。単位容積質量は、使用材料の性質や配合などによって異なるが、本解析では実験結果と比較するため、6.2.3(5)で述べたように実験に使用した材料および配合

を用いて実測し、表 6.4 および図 6.6 の結果を得ているので、これを参考にして次のようにした。単位容積質量の違いは外力の違いとして直接影響するので、この違いの影響について検討するため、スランブ値 0 cm および 10 cm の場合については、2.20, 2.25, 2.28, 2.30 および 2.35  $\text{t}/\text{m}^3$  の 5 種に変えた。この結果を考慮して、他のスランブ値の場合は、平均的な 2.28  $\text{t}/\text{m}^3$  とした。

ヤング係数を実測することは困難である。しかし、解析においては、コンクリートを線形弾性体と仮定したため、外力に対する節点変位を求める際と、節点変位から応力を計算するときとでヤング係数は相殺し、応力度を求める場合には、ヤング係数の大きさは無関係となる。したがって、本解析においては 100 Pa を使用した。

フレッシュコンクリートのポアソン比も、ヤング係数と同様に実測することは困難である。ポアソン比は、前述したようにスランブコーンを取り除いたときのコンクリートの変形はせん断変形であることから、コンクリートの変形は主として液相の部分で生じ、作用する応力も小さいと思われるので、非圧縮性流体のポアソン比である 0.5 に近いものであると考えられる。解析においては、ポアソン比として 0.5 が使用できないので、ポアソン比の影響を調べるスランブ値 0 cm および 10 cm の場合には、ポアソン

比は 0.45, 0.46, 0.47, 0.48 および 0.49 の 5 種に変えた。他のスランプ値の場合については、この結果を参考にして 0.49 をポアソン比として用いた。

これらの解析条件の組合せは、表 6.5 に示す。

境界条件としては、スランプ試験における底板とスランプしたコンクリートの底面との間にはすべりが生じないとし、底板と接する各節点は、 $r$  (半径方向)、 $z$  (スランプしたコンクリートの対称軸方向) 方向の変位を拘束し、軸対称問題としたので、 $z$  軸上の各節点は  $r$  方向の変位を拘束した。

### (3) 解析プログラム

軸対称応力状態においては、円周方向の応力度  $\sigma_\theta$  が発生するために 3 次元応力状態となるので、最も一般的な平面応力状態での主応力度および最大せん断応力度の求め方をそのまま使用することができない。

主応力度は、次式の 3 実根で与えられる。

$$\sigma^3 - I_1\sigma^2 - I_2\sigma - I_3 = 0 \quad (6.9)$$

ただし、

$$I_1 = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} \quad (6.10)$$

$$I_2 = \begin{vmatrix} \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_{33} & \sigma_{31} \\ \sigma_{13} & \sigma_{11} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} \end{vmatrix} \quad (6.11)$$

$$I_3 = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{vmatrix} \quad (6.12)$$

$\sigma$ : 応力度

ところが、図 6.8 に示したように  $r, z$  軸をとると軸対称応力問題では、 $r-z$  平面には垂直応力度の  $\sigma_\theta$  のみが発生し、せん断応力度は発生していないので、主応力度の定義により  $\sigma_\theta$  は主応力度の 1 つとなる。したがって、 $r-z$  平面は 1 つの主面となり、この面内に他の 2 つの主応力度が存在することになる。

3 次元応力状態におけるモールの応力円を考えてみると、図 6.11 に示すようになる。この図の斜線の部分が 3 次元のすべての応力状態を表している。 $\sigma_\theta$  はすでにわかっているので、図の 3 つの円のうち 2 つの円については  $\sigma$  軸上の 1 点が決まる。したがって、 $\sigma$  軸上の残りの 2 点の位置すなわち残りの 2 つの主応力度を求めることができれば、3 次元応力状

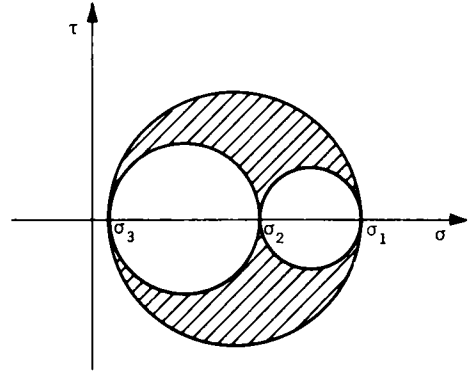


図 6.11 3 次元応力状態の Mohr の応力円

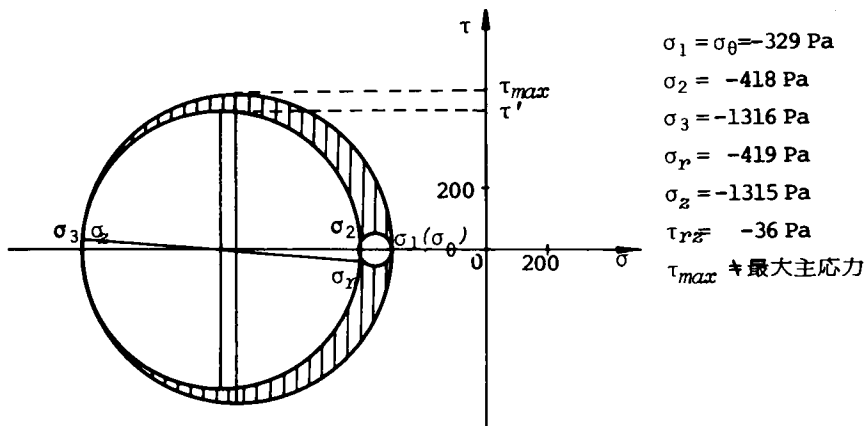
態における Mohr の応力円が完成する。この 3 つの円の中で最大の半径が 3 次元応力状態の最大せん断応力度になる。

いま、 $r-z$  平面内に主軸が存在することがわかっているので、 $\sigma_r$  および  $\sigma_z$  を使って  $r-z$  平面内の主応力を求めることができる。

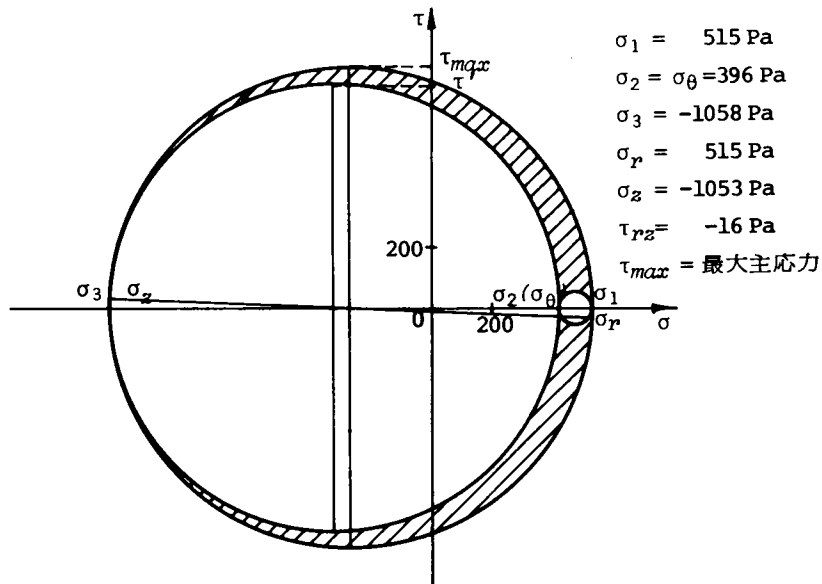
一方、スランプしたコンクリートの典型的な Mohr の応力円は、図 6.12 に示すようになり、3 つの境界円の中の 1 つが他の 2 つの境界円に比べて非常に小さくなっている。これは、 $\sigma_r$  と  $\sigma_\theta$  との値がよく似ていることによるもので、この関係は、半径方向のひずみ成分  $\epsilon_r$  と円周方向のひずみ成分  $\epsilon_\theta$  の定義式から推察される。すなわち、半径方向の節点変位を  $u$ 、半径を  $r$  とすると、 $\epsilon_r = \frac{u}{r}$  であり、 $\epsilon_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r}$  となり、 $u$  が  $r$  にほぼ比例するような節点変位ならば、 $\epsilon_r \approx \epsilon_\theta$  となり、 $\sigma_r \approx \sigma_\theta$  となる。

したがって、最大せん断応力を求める場合に、 $\sigma_\theta$  を無視し、 $r-z$  平面内のみでの応力解析を行う近似解法を用いることができる。本解析においては、最大主応力の方向および最大せん断応力度をこの近似解法を用いて求め、最大せん断応力度については、 $\sigma_\theta$  の影響について修正した。なお、この修正による値はわずかであり、近似解法による  $\sigma_r$  および  $\sigma_z$  にはすでに  $\sigma_\theta$  の影響を含んでいるものの、精度的には近似解法で十分であろう。

本解析に用いた解析用プログラムのフローチャートを図 6.13 に示す。



(a)  $r-z$  平面内の主応力の大きい方と最大主応力が一致しない場合



(b)  $r-z$  平面内の主応力の大きい方と最大主応力が一致する場合

図6.12 スランブしたコンクリートの3次元応力状態の Mohr の応力円

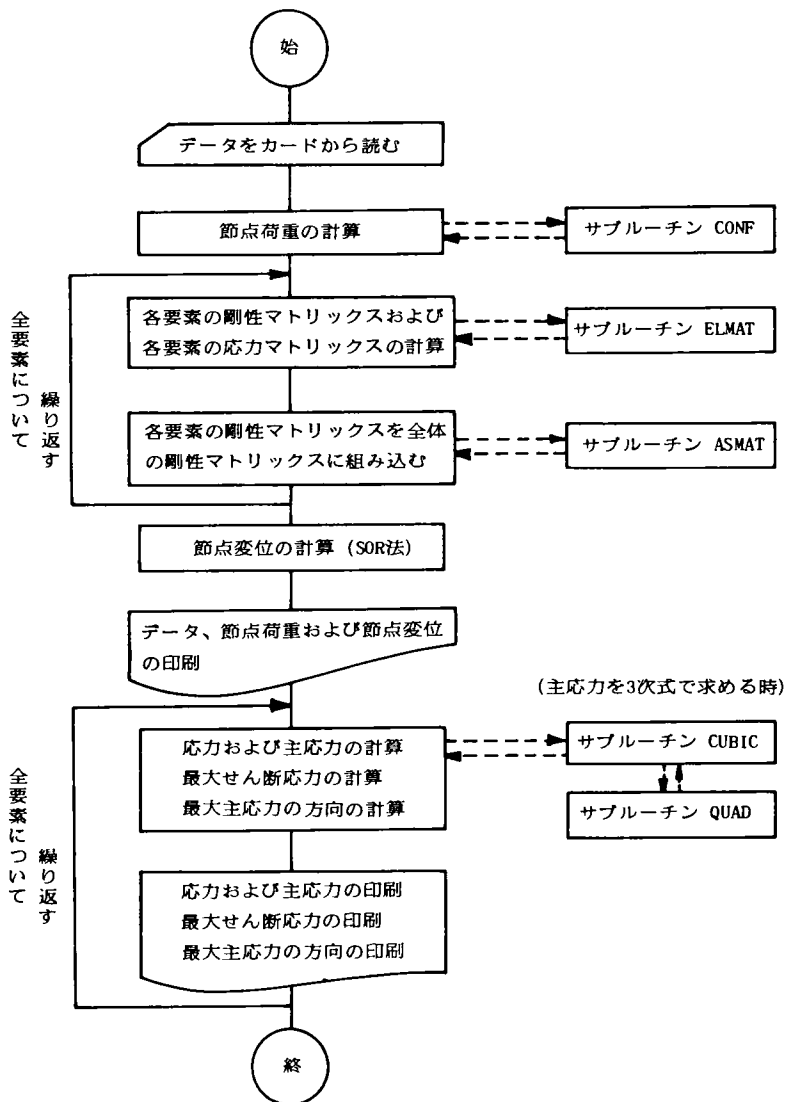


図6.13 プログラムのフローチャート

### 6.3.3 解析結果およびその考察

#### (1) 要素分割数の影響

有限要素の形状や数の影響を検討するため、表 6. 5 に示したようにスランプ値が 0 cm と 10 cm の場合について、要素分割数を 3 種に変えて解析した結果を図 6.14 (a)~(c) および図 6.15 に示す。図 6.14 および図 6.15 に見られるように分割数の多少によって最大せん断応力度の分布状況および最大せん断応力度の最大値は異なっている。しかし、スランプ値が

0 cm の要素数 69 の図 6.14 (b) と要素数 135 の図(c) とでは分布の状況もよく似ており、最大値もほぼ一致している。スランプ値 10 cm の図 6.15 の場合もスランプ値 0 cm のときと同様に要素数の多い 2 つのケースは、よく似た結果となっている。

また、要素分割数が応力の分布状況に及ぼす分割要素の方向性、節点変位の収束性などの問題があるが、本解析においては、以上の結果およびスランプ値の大きい場合のスランプしたコンクリートの寸法

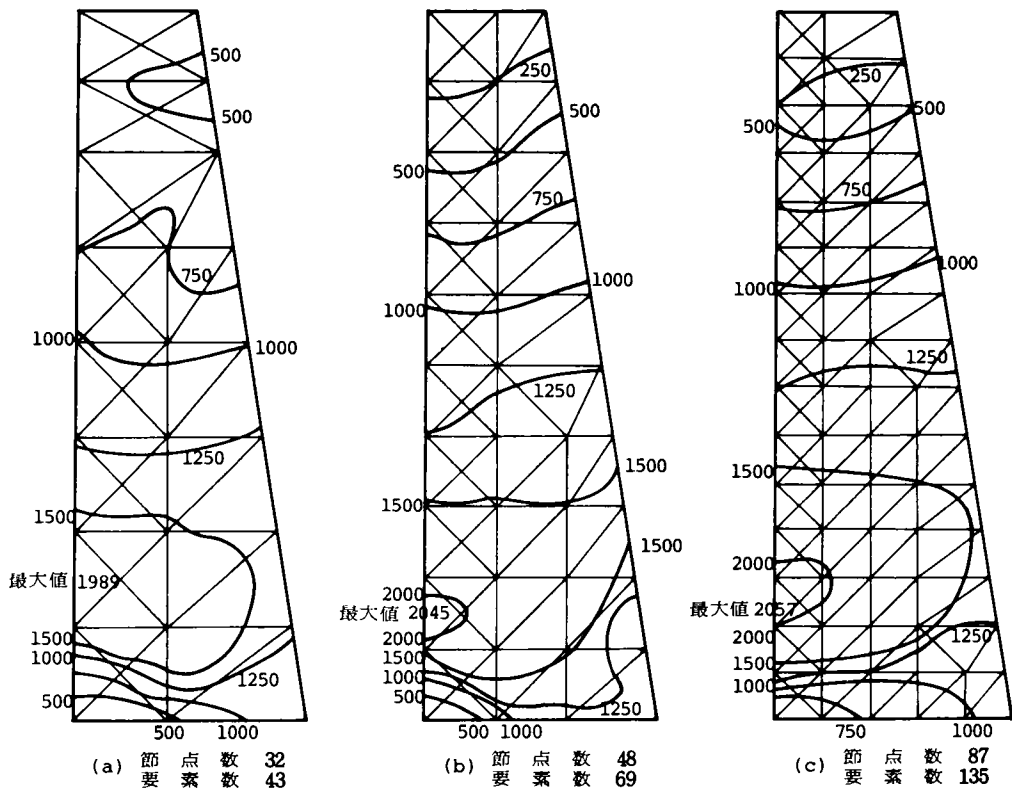


図6.14 スランプ値 0 cm の場合の最大せん断応力度の分布

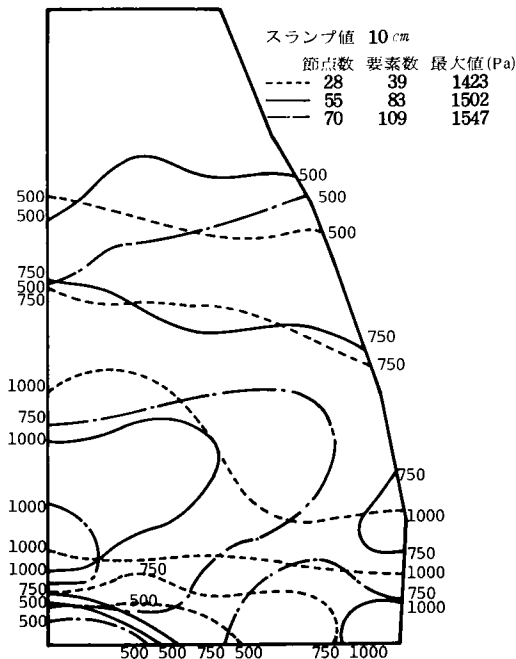


図6.15 スランプ値 10 cm の場合の最大せん断応力度の分布

を考慮して、対称軸上での一辺の長さが 2 cm 以下になる一番密な要素分割によることとする。

## (2) フレッシュコンクリートの単位容積質量の影響

スランプ値 10 cm の場合の単位容積質量の違いが、最大せん断応力度の分布およびその最大値に及ぼす影響の結果を図 6.16 に示す。この図に見られるように、コンクリートの単位容積質量の大小は、最大せん断応力度の分布形状およびその最大値に影響し、単位容積質量の大きい方が最大値は大きいという当然の結果となっている。しかし、本研究の場合のようによく似た比重の骨材を用いた場合には、配合がかなり広範囲に変化しても図 6.6 に示したように単位容積質量は、ほとんどのものが 2.25~2.30 t/m<sup>3</sup>の間にあり、最大せん断応力度の最大値を問題にする限りにおいてその誤差は 1 % 程度である。もっと単位容積質量の違いを大きく 0.15 程度に拡げても最大値は 4.5 % の誤差範囲にあり、この程度では大きな影響を及ぼしていない。この結果は、スランプ値



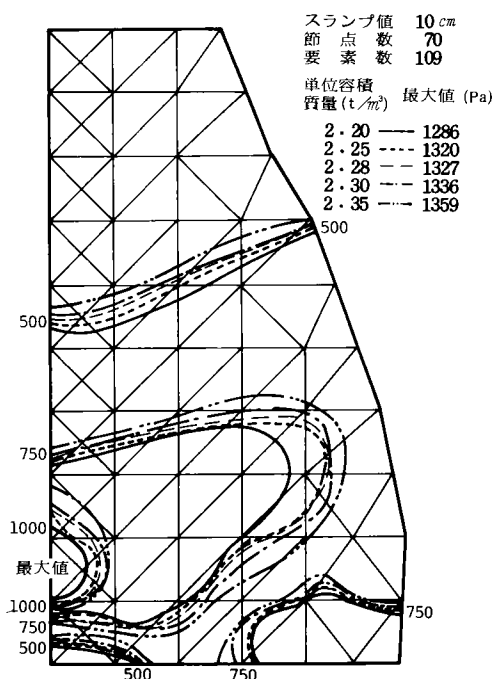


図6.16 フレッシュコンクリートの単位容積、質量の違いがせん断応力度の分布に及ぼす影響

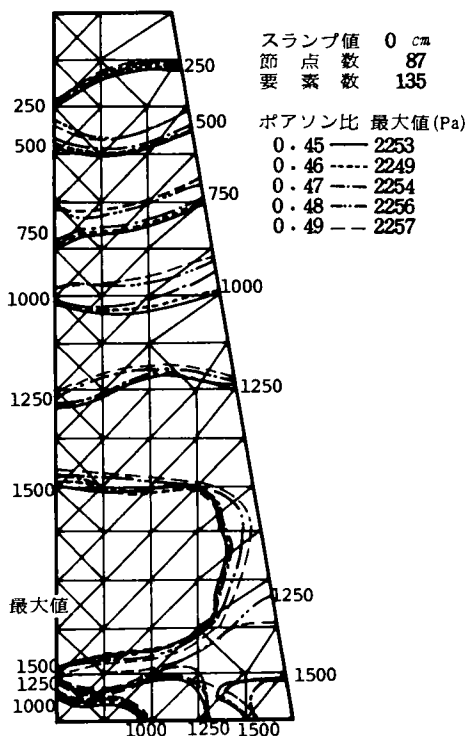


図6.17 ポアソン比の違いがせん断応力度の分布に及ぼす影響

0 cmの場合もほぼ同様である。

したがって、本研究では、最大せん断応力度の最大値と実測した降伏値との関係を比較するために解析に用いるコンクリートの単位容積質量は、実測値の平均である  $2.28 \text{ t/m}^3$  とする。

しかし、軽量骨材や重量骨材など比重の大きく異なる骨材を用いた場合のようにコンクリートの単位容積質量がかなり相違するときは、その単位容積質量を用いて解析する必要がある。

### (3) ポアソン比の影響

ポアソン比を 0.45, 0.46, 0.47, 0.48 および 0.49 に変えたスランプ値 0 cm の場合の結果を図 6.17 に示す。

この図に見られるように、ポアソン比が異なっても最大せん断応力度の分布の状況およびその最大値は、ほとんど変化していない。また、スランプ値が 10 cm の場合も同様の結果となっている。

フレッシュコンクリートのポアソン比は不明であるが、前述したようにそのせん断変形は、主として流体部分で生じ、体積変化はほとんどないと考えられるので、以上の結果と考え合わせてポアソン比としては 0.49 を用いて解析しても大きい誤差は生じな

いと思われる。

したがって、本研究では、ポアソン比を 0.49 とし て解析する。

### (4) 最大せん断応力度の作用方向

スランプ値別の最大せん断応力度の作用方向を図 6.18～図 6.23 に示す。

スランプ試験において、スランプコーンを取り去った後の流動は、各スランプ値における瞬間の弾性的つり合いの連続したものと考え、図 6.18～図 6.23 に示す各スランプ値における最大せん断応力度の作用方向にコンクリートは変形（流動）して行くものと近似できる。

これらの図によるとコンクリートは中心部から少し上向きで外側に流動することが示されており、図 6.2 および図 6.5 に見られるようなスランプ値 10～20 cm のスランプしたコンクリートの円周部が底板に近いところで膨らんでいることおよび頂部の中央部がへこむことが説明できる。

また、スランプコーンを除去したときの底面の周辺部に上部からコンクリートが流れ込んでくる状況

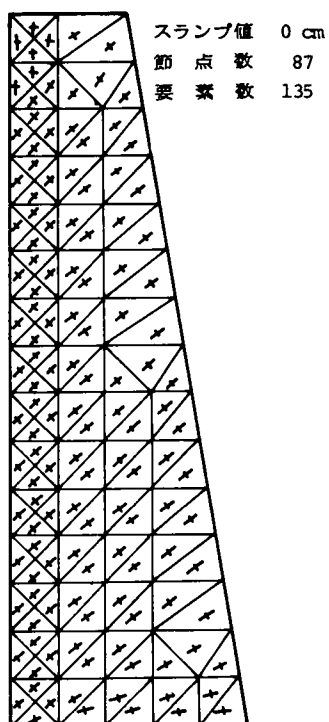


図6.18 最大せん断応度の作用方向 (スラブ値 0 cm)

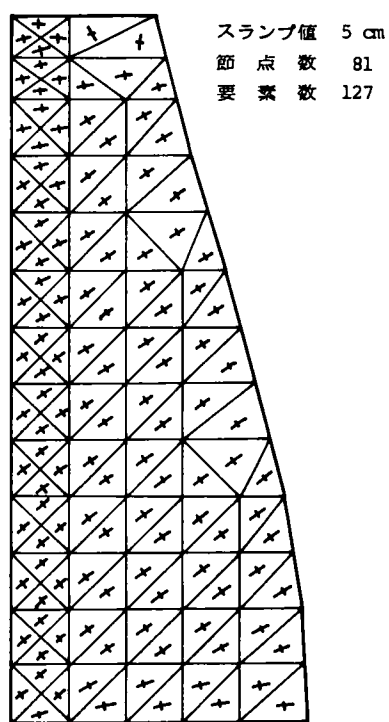


図6.19 最大せん断応度の作用方向 (スラブ値 5 cm)

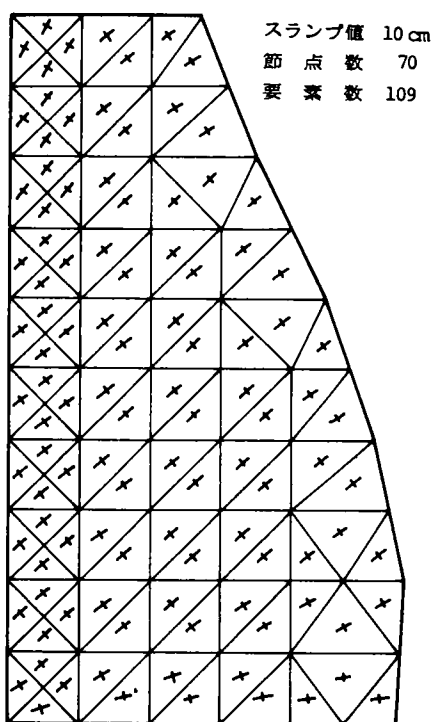


図6.20 最大せん断応度の作用方向 (スラブ値 10 cm)

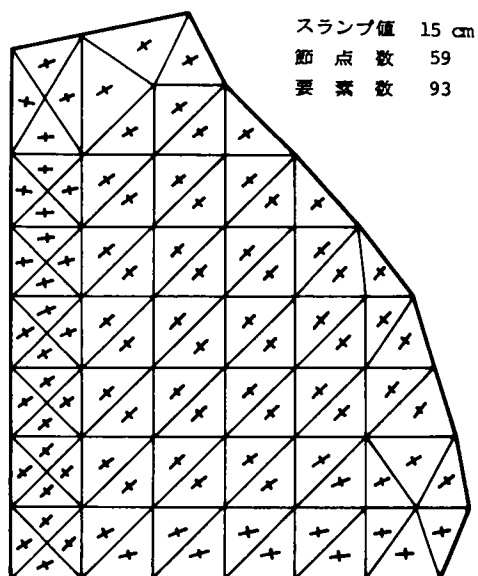


図6.21 最大せん断応度の作用方向 (スラブ値 15 cm)

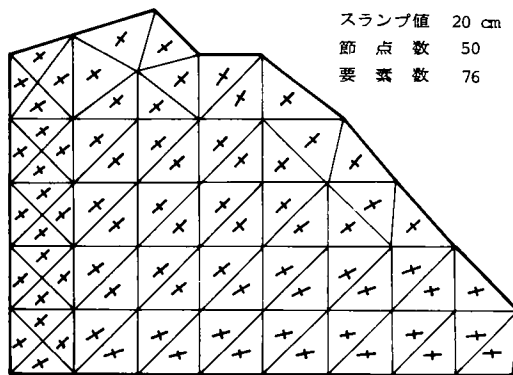


図6.22 最大せん断応度の作用方向（スランプ値20cm）

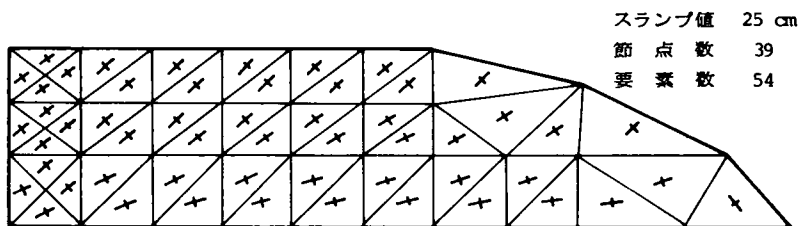


図6.23 最大せん断応度の作用方向（スランプ値25cm）

も説明している。

このように、本解析方法による結果は、スランプ試験の際のコンクリートの変形性状をよく説明しており、解析手法は妥当であると考えられる。

村田ら<sup>6-10,11)</sup>は、最大せん断応力度の作用方向は、鉛直に対して45°傾くとしており、本解析結果では、底部付近を除くとほぼ45°となり一致しているが、底部付近では水平方向に近くなっており、村田らの仮定と異なった結果となっている。

#### (5) スランプ値と最大せん断応力度の最大値との関係

各スランプ値におけるそれぞれの要素の最大せん断応力度がその重心の位置にあるとして等応力度線を描いたものを図6.24～図6.29に示す。

最大せん断応力度の最大値は、図6.24～図6.28に示されているように、スランプ値が20 cmまでは中央部の底面から約3 cmのところで生じている。スランプ値25 cmでは、外周部の底面に近いところで生じており、スランプ値が20 cm以下の場合もこの位置の最大せん断応力度は、極値となり比較的大きな値となっている。

また、等最大せん断応力度は、これらの図に見られるように曲線上にあり、村田ら<sup>6-10)</sup>が、仮定している底面から同じ高さの最大せん断応力度は同じであるということとは、頂部および中間部で比較的一致している部分もあるが、周辺部やとくに底部では大きく異なっている。

前述したように、このスランプしたコンクリートの内部に発生している最大せん断応力度の最大値がある値を越えるとコンクリートは流動し、ある値以下であればコンクリートは静止するという仮定から、スランプ値とこの最大値との関係を求めてみると、図6.30のようになり、ほぼ線形関係が示されている。

村田らの解析結果<sup>6-11)</sup>を図6.30に示したが、本解析結果と大きく異なっている。この理由の1つとして、村田らは底板の拘束の影響を図6.7に示したように考えているが、6.3.1で述べたように、つり合った状態は弾性的につり合っていると仮定するならば、底板からの抵抗力はコンクリートの底面のみに作用し、図6.7のようにはならないことであり、他には、式(6.2)において $\tau_y + S_e$ とされていることは、コン

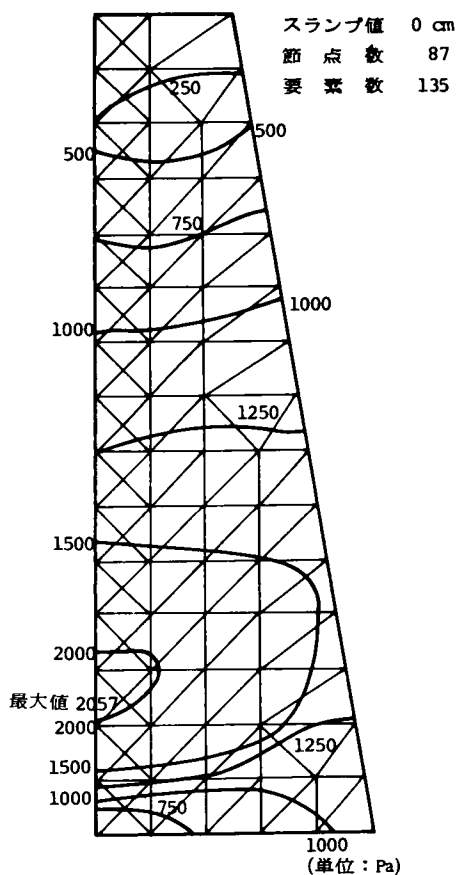


図6.24 最大せん断応度の分布 (スランプ値 0 cm)

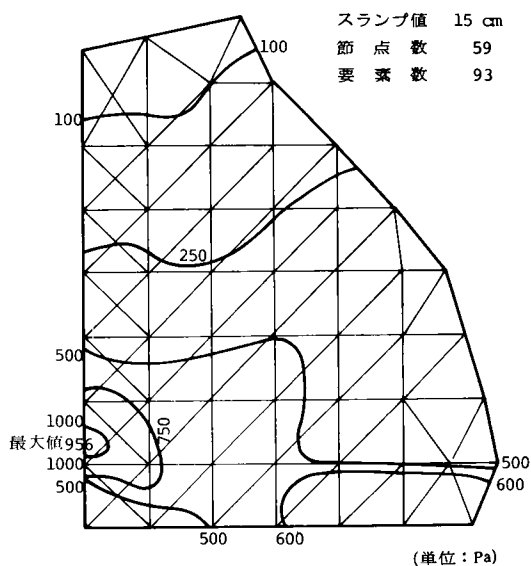


図6.27 最大せん断応度の分布 (スランプ値 15 cm)

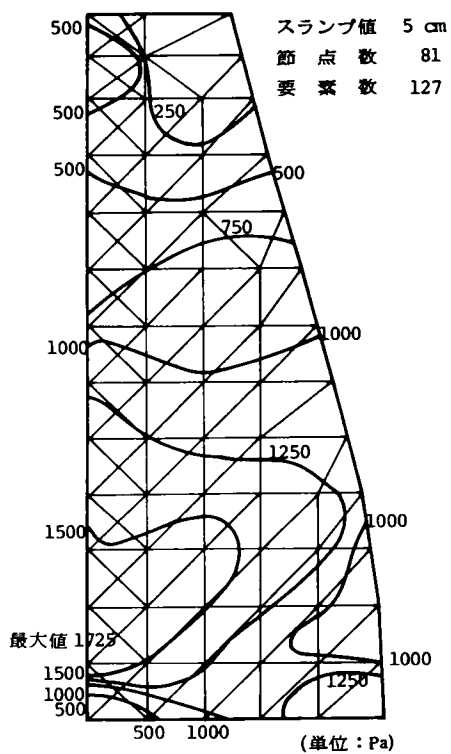


図6.25 最大せん断応度の分布 (スランプ値 5 cm)

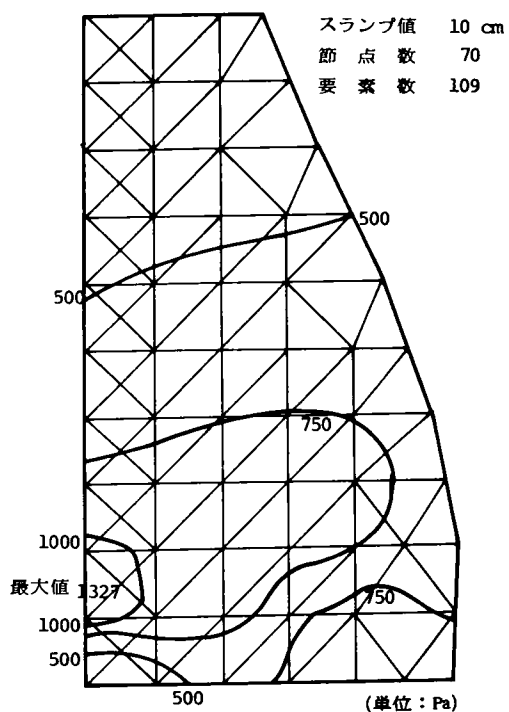


図6.26 最大せん断応度の分布 (スランプ値 10 cm)

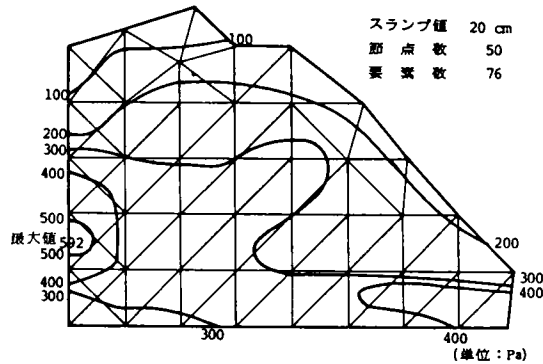


図6.28 最大せん断応度の分布 (スラップ値20cm)

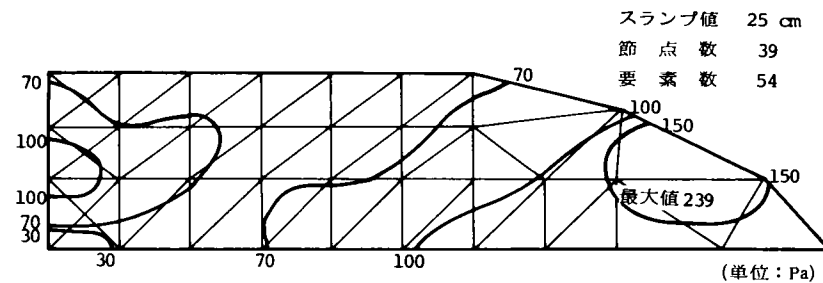


図6.29 最大せん断応度の分布 (スラップ値25cm)

クリート内部に発生するせん断応力度が  $\tau_y + S_e$  になるまで流動しないということで最初の仮定と矛盾していることなどによると考えられる。

そこで、村田らの理論<sup>6-10,13)</sup>において、単に弾性体としてのつり合いのみを考えた式を用いて、スラップ値とせん断応力度の最大値(降伏値)との関係を求めてみると、図 6.30 の一点鎖線となり、本解析結果とはスラップ値 0 cm および 25 cm のところで差が約 100 Pa 程度と小さくなっている以外ではかなり異なっている。これは、村田の理論ではスラップコーンを取り除いた後のコンクリート内部のせん断応力度は、すべて降伏値と等しいとおていることが、本解析結果と異なるところであり、これが原因の 1 つと考えられる。

また、スラップコーンを取り除いてもせん断応力度が降伏値以下で流動しない高さ  $h_0$  があるとした村田ら<sup>6-10)</sup>の理論では、たとえばスラップ値 10 cm の場合  $h_0 = 7.8$  cm となるが、スラップしたコンクリートの形状を実測した図 6.5 (c) から見ると 4 cm がそれ以下であり、仮定に問題があることも考えられる。

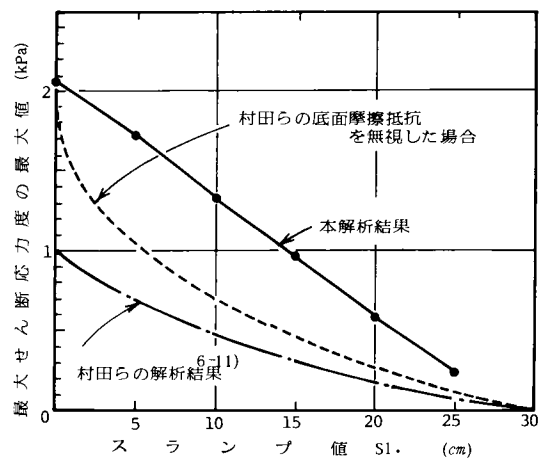


図6.30 スラップ値と最大せん断応力度の最大値との関係

#### 6.3.4 まとめ

スラップしたコンクリートの内部に発生している最大せん断応力度の最大値は、スラップ値の大きさによって異なり、図 6.30 に示すようなほぼ線形関係

となっている。また、スランブしたコンクリート内部での最大せん断応力度の最大値は、スランブ値の大小にかかわらずスランブ値 25 cm の場合を除くと、中央部の底面より約 3 cm のところで生じており、スランブ値 25 cm の場合は周辺部で生じている。

弾性体と流体の性質とを混用させた村田らの結果に対して、同一スランブ値において本解析結果は約 2 倍となっている。この原因としては、村田らの理論における仮定に若干の問題点があると考えられる。

なお、粗骨材の最大寸法 15 mm、細骨材率 43 %、水セメント比 0.59 のような荒荒しいコンクリートでは、同一スランブ値であってもスランブしたコンクリートの形状が特異となり、本解析で用いたモデルとは異なっており、今後の課題として残っている。

また、フレッシュコンクリートの単位容積質量が  $2.28 \text{ t/m}^3$  よりも大きく相違する場合には、図 6.30 に示したスランブ値と最大せん断応力度の最大値との関係が異なることに注意する必要がある。

## 6.4 せん断応力度の最大値と降伏値との比較

### 6.4.1 はじめに

前節で述べたように、スランブしたコンクリートの内部に発生しているせん断応力度の最大値とスランブ値とはほぼ線形関係となることがわかった。

一方、第 3 章において述べたようにフレッシュコンクリートは、ビンガム物体と近似できることが示されており、降伏値以上の応力度を受けると流動し、これ以下の応力度では流動しない。

したがって、スランブして静止したコンクリートの内部に発生しているせん断応力度の最大値は、コンクリートをビンガム物体と仮定するならばビンガム降伏値と考えることができる。

そこで、本節では、フレッシュコンクリートをビンガム物体と仮定し、コンクリートの配合を変えてスランブ値および平行板プラストメータを用いて降伏値を測定し、前節で求めた最大せん断応力度の最大値と降伏値とをスランブ値をパラメータとして比較し、最大せん断応力度の最大値と降伏値との関連について実験的に検討する。

### 6.4.2 実験計画および実験の方法

#### (1) 実験計画

解析で求めた最大せん断応力度の最大値と実測した降伏値とを比較するため、前節で用いたスランブしたコンクリートの形状のモデル化および単位容積質量の測定と同時に降伏値を測定した。スランブ値の範囲は、1 ~ 15 cm とした。また、かなりの誤差を含むものもあると考えられるが、参考としてスランブ値 15 ~ 21 cm のものについても測定した。

各測定は、同一条件について日を変えて 2 回行い、その平均を測定値とした。

#### (2) 使用材料および配合

6.2.2 で使用したものと同じ普通ポルトランドセメント、粗粒率 2.76 の川砂および最大寸法 15 mm の砂岩碎石および川砂利を用いた。

配合も表 6.2 に示す 6.2.2 と同じもので、すべて体積濃度で表した。セメント体積濃度  $v_c$  で 0.35 ~ 0.50 すなわち水セメント比  $W/C$  では 0.59 ~ 0.32、粗骨材の体積濃度  $v_g$  で 0.0 (モルタル) ~ 0.40 すなわち細骨材率  $s/a$  では 100 ~ 43 % に変えた配合とした。

また、各配合では、粗骨材の粒度を碎石では 5 ~ 15 mm、10 ~ 15 mm、5 ~ 10 mm の 3 種、川砂利では 5 ~ 15 mm とし、計 98 種の配合について測定した。

#### (3) 練り混ぜおよびスランブ試験

試料 35 l を容量 50 l の強制練りミキサで全材料投入後 3 分間で練り混ぜた。試料温度は、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$  になるように練り混ぜ水の温度を変えて管理した。

練り混ぜ終了後、練り板上に排出した試料を 2 往復切返し、JIS A 1101 - 75 の方法に従ってスランブ値を 3 分以内に同時に 2 個測定した。

#### (4) 降伏値の測定

ビンガム物体と仮定したフレッシュコンクリートの降伏値の測定には、第 3 章 3.5.3 に述べた平行板プラストメータ III 型を使用した。

試料直径は 60 cm とし、試料高さは約 6 cm として、測定手順は、第 3 章 3.5.3 に述べた方法と同一にした。測定は、練り混ぜ終了後約 8 分で終了するようにした。

降伏値は、第 3 章 3.5.2 で述べた平行板に関する岡の理論式<sup>6-15,16)</sup>を用いて描いたコンシステンシー曲線の直線部の延長線と  $\tau$  軸との切片として求めた (図 3.26 参照)。

なお、測定は同一配合について日を変えて 2 回行

い、その平均を測定値とし、2回の測定値が大きく異なっている場合には、再測定を行い、それを採用した。

#### 6.4.3 実験結果およびその考察

前項(2)で述べた98種のコンクリートについて実測したスランプ値と降伏値との関係および前節6.3で求めた最大せん断応力度の最大値とスランプ値との関係を図6.31に示す。

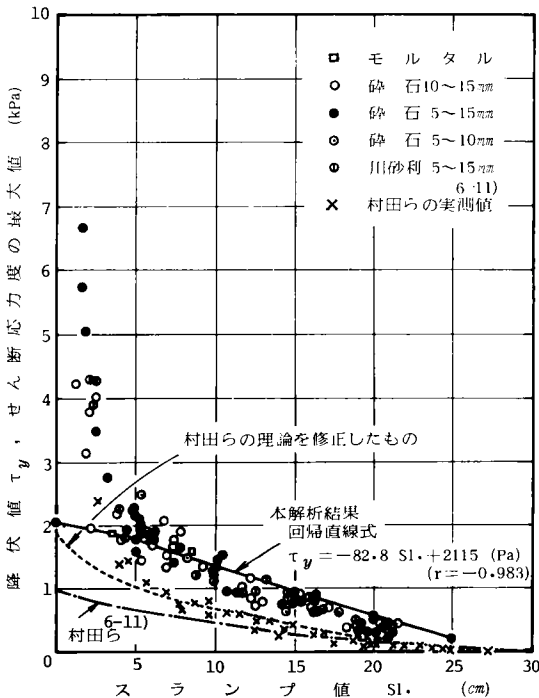


図6.31 スランプ値と降伏値およびせん断応力度の最大値との関係

図に見られるようにスランプ値をパラメータとして示した実測降伏値と本解析結果の最大せん断応力度の最大値とは、スランプ値が数cm～十数cmの範囲でよく似た結果となっている。しかし、もっと詳細に見れば、スランプ値が10cm程度より大きくなると降伏値は、本解析結果よりもほとんどのものが下側にあり、解析結果は実測降伏値よりも大きな値を与えている。逆にスランプ値の小さい部分では、実測降伏値が解析結果よりも大きく、スランプ値が小さいほどその差は大となっている。

村田ら<sup>6-11,13)</sup>の理論値を図6.31に示すと、図中の

一点鎖線となり、本実測値よりも全般にかなり小さな値を与えている。また、6.3.3(5)で述べたように村田らの理論を修正した場合の結果も、図6.31に示したように、本実験結果よりは小さくなっている。村田ら<sup>6-11,13)</sup>による降伏値の実測値を図6.31に×印で示すと、図に見られるように、本実験の結果より全般的に小となっている。

この原因としては、村田らと著者との降伏値の測定装置が異なり、村田ら<sup>6-11,13)</sup>の斜面試験装置では、斜面と試料との面に発生しているせん断応力度を測定しているのであって、斜面と試料との間にすべりが無いとすれば、斜面に近い試料中のせん断応力度と考えられ、降伏値に密接な関係があると思われるが、斜面とコンクリートとの間にはすべりが考えられ、斜面試験装置による降伏値はみかけ上小さくなっている可能性がある。また、降伏値は、流動しているものから外挿して静止状態のものとして求められており、スランプ試験や平行板プラストメータ中の試料は、この状態に近いものと考えられる。

一方、スランプ値が数cm以下では、最大せん断応力度の最大値と実測降伏値とは大きく相違し、降伏値は解析値の3.5倍になっているものもある。これは、解析、実験ともにフレッシュコンクリートを均一材料でしかも連続体として仮定している。しかし、スランプ値が小さくなるとコンクリートは、空隙が多くなりまた粗骨材同士の接触抵抗が増大し、均一な連続体として流動しなくなることが一因と思われる。

また、スランプ値が15cm程度以上では、実測値が解析値よりも小となっている。これは、第3章3.4.4(6)で述べたように試料と円板とが円周部で離れていることによる誤差によることも考えられる。

以上述べてきたように、本解析によるスランプしたコンクリートの内部に発生する最大せん断応力度の最大値と平行板プラストメータで測定した降伏値とは、スランプ値が数～十数cmの範囲ではよく似た結果となっており、スランプ値は降伏値のよい指標と考えられる。

また、スランプしたコンクリートの内部に発生しているせん断応力度の最大値とビンガム降伏値とが等しい意義を持つものと考ええると、スランプ値SI (cm)と降伏値 $\tau_y$  (Pa)とは、ほぼ直線関係になり、次式が得られる。

$$\tau_y = -82.8 \text{ Sl} + 2115 \quad (6.13)$$

(相関係数  $r = -0.983$ )

しかし、スランプ値が数cm～数十cmの範囲外では、実測降伏値と解析値とが異なり、解析上の仮定や降伏値の測定方法の適否などについての検討が必要である。

## 6.5 結 語

一般の工事現場でフレッシュコンクリートのレオロジー的性質を測定するためには、簡便な方法が必要である。しかし、現在のレオロジー定数の測定装置は、大型でしかもその測定方法もかなり複雑であり、現場で使用することは難かしい。

これを解決する1つの方法として、現在用いられている測定方法のレオロジー的意義づけがあり、最も良く使用されているスランプ試験について検討した。

フレッシュコンクリートをビンガム物体と仮定し、スランプ試験において、コンクリート内部に発生するせん断応力が降伏値以下になると流動が停止すると考えると、スランプ値  $\text{Sl}$  (cm) と降伏値  $\tau_y$  (Pa) とはほぼ線形関係となり、次式が得られた。

$$\tau_y = -82.8 \text{ Sl} + 2115 \quad (6.13)$$

( $r = -0.983$ )

また、スランプ値が数cm～数十cmの範囲では、この関係式と降伏値の実測値とはよく一致しており、スランプ値は、本研究で用いた平行板プラストメータで求められる降伏値のよい指標であることが示された。

しかし、スランプ値が小さい部分や大きい部分においては、解析値と実測値との間には違いがあり、この原因については今後検討が必要である。

なお、人工軽量骨材や重量骨材などを用いた単位容積質量が本研究の場合と大きく異なるコンクリートでは、ここで得られた関係式が相違することや混和剤を用いたコンクリートでもこの関係が適用できないことが考えられる。

## 参考文献

- 6-1) 村田；コンクリート用回転粘度計について，土木学会第28回年次学術講演会講演概要集，第5部，1973，pp. 146—148.
- 6-2) 牟田；湿式吹付耐火被覆のポンプ圧送施工に関する研究，第1報，日本建築学会論文報告集，No270，1978，pp. 1—6. 第2報，同報告集，No271，1978，pp. 7—14. 第3報，同報告集，No272，1978，pp. 1—10.
- 6-3) 村田，菊川；まだ固まらないコンクリートのレオロジー定数測定法に関する一提案，土木学会論文報告集，No284，1979，pp. 117—126.
- 6-4) Tattersall, G.H.; The rationale of a two-point workability test, Mag. of Conc. Research, Vol. 25, No84, 1973, pp. 169—172.
- 6-5) Tattersall, G.H.; Relationships between the British Standard tests for workability and the two-point test, Mag. of Conc. Research, Vol. 28, No96, 1976, pp. 143—147.
- 6-6) Tattersall, G.H. and S.J.Bloomer; Further development of the two-point test for workability and extension of its range, Mag. of Conc. Research, Vol. 31, No109, 1979, pp. 202—210.
- 6-7) 村田；まだ固まらないコンクリートのレオロジーの研究，コンクリートジャーナル，Vol. 10, No12, 1972，pp. 1—10.
- 6-8) Meyer, U.T.; Measurement of the workability of concrete, Jour. of ACI, Vol. 59, 1962, pp. 1071—1080.
- 6-9) 水口，藤崎，渡辺；有限要素法によるスランプ試験の解析，第29回土木学会年次学術講演会講演概要集，第5部，1974，pp. 75—76.
- 6-10) 村田；まだ固まらないコンクリートのレオロジーに関する指標，土木学会第30回年次学術講演会講演概要集，第5部，1975，pp. 101—102.
- 6-11) 村田，下山；静的荷重によるフレッシュコンクリートの変形，セメント技術年報，Vol. 30, 1976, pp. 270—273.
- 6-12) 村田；フレッシュコンクリートの流動と変形，土



- 木学会第 31 回年次学術講演会講演概要集，第 5 部，1976，pp. 272—273.
- 6-13) 村田；まだ固まらないコンクリートのレオロジーに関する基礎的研究，コンクリート工学，Vol. 15，No 1，1977，pp. 25—34.
- 6-14) 森永；コンクリートポンプの管内圧送圧に関する研究，コンクリートジャーナル，Vol. 9，No 7，1971，pp. 1—2.
- 6-15) 岡，小川；平行板ブラストメータの理論，材料試験，Vol. 9，1960，pp. 321—324.
- 6-16) 岡；ビンガム物体に対する平行板ブラストメータの理論，材料，Vol. 12，1963，pp. 314—316.

## 第7章 結 論

本研究は、コンクリートを製造する際の品質管理を一定の規準で行い、コンクリート施工の合理化、省力化を達成するために必要なフレッシュコンクリートの性質を物理的な意味を持った指標を用いて定量的に表し、構造物の形状・寸法や施工方法に関連して決められる適切なフレッシュコンクリートの品質を決定するための基礎的資料を得ることを目的とし、一連の実験を行うことによって検討したものである。

以下に本研究から得られた結果を要約し、今後の問題点についてふれ本論文の結論とする。

本論文では、まず第1章において本研究の目的と工学上の意義を明らかにし、第2章において本研究に直接関係する従来の研究を紹介するとともに、フレッシュコンクリートのワーカビリティに対する著者の考え方を示し、本研究の位置づけを行った。

第3章では、フレッシュコンクリートの性質を物理的な意味を持った数値すなわちレオロジー定数で表すための測定方法について検討した。

測定装置としては、静的測定方法に分類される二重円筒型回転粘度計、落球型粘度計である球ひきあげ粘度計および平行板ブラストメータおよび動的測定方法で試料に与える外乱を少なくし試料の内部構造を大きく破壊することなく測定できる Raised Cosine Pulse 法を採り上げ、これらの測定装置による測定方法・精度、適用性などについて検討した。

その結果、フレッシュペースト、モルタルおよびコンクリートは、変形速度の小さいところでは、応力軸に対して凸になる流動曲線を示すが、全体としては直線に近似でき、ビンガム物体と仮定できることが示された。

コンシステンシーの大きい試料は、回転粘度計および球ひきあげ粘度計を用いてそのレオロジー定数を測定することができ、スランプ 12 cm 程度以下のコンシステンシーの小さい試料には平行板ブラストメータが適することがわかった。しかし、回転粘度計

や球ひきあげ粘度計では、試料と接する容器壁面や球の通過した後の空洞に水分の多い部分が発生し、いわゆるすべりが生ずるので、レオロジー定数の絶対的な値を求めるためには、何らかの対策あるいは補正が必要であることが示された。一方、実際のコンクリート施工におけるパイプ、シュートなどフレッシュコンクリートが流動している壁面では、前述のすべり層が発生していることが考えられるので、このすべりに対する補正をしないで求めたレオロジー定数を利用できる可能性がある。

平行板ブラストメータでは、変形速度が小さい範囲で測定を行うため、前述したフレッシュコンクリートが完全なビンガム流動を示さないことから、その変形速度を適切な大きさにする必要があり、試料高さの最初の変形速度は、0.2~0.4 mm/s 位が適当とわかった。また、測定精度は、同一試料に対してほとんどのものが変動係数で 10 % 以内となった。

Raised Cosine Pulse 法のように他の方法に比べて非常に小さな変形しか与えない場合でも、試料と容器壁面との間にすべりが考えられ、Raised Cosine Pulse の周波数などの測定条件を変えることによって測定値は異なり、この方法による物性定数の相対的な比較はできるが、絶対的な値を測定するためには、若干の問題点が指摘された。

このように、フレッシュモルタルやコンクリートは、ビンガム物体と近似でき、平行板ブラストメータでは、小さいコンシステンシーの試料のレオロジー定数をかなりの精度で測定できることがわかったが、広い範囲の配合にわたって施工条件と関連づけうるレオロジー定数を求めるためには、測定中に生ずる材料分離による試料の不均一性に対する対策や施工と関連づけたその解釈を含み、測定装置や測定方法について今後更に検討が必要である。

第4章では、コンクリートの施工条件から要求される性質を持ったフレッシュコンクリートの配合を効率よく選定するために、コンクリートの使用材料

や配合要因とそのレオロジー的性質とを関係づけるフレッシュコンクリートのレオロジー構成式を、実験的に検討した。

フレッシュペースト、モルタルおよびコンクリートを連続相と分散相とから成る2相材料と考え、ビンガム物体すなわち降伏値と塑性粘度とで記述できる物質と仮定し、これらの性質に大きく影響する配合要因および使用材料の性質主として細骨材および粗骨材の粒度・粒形を要因として定式化を試みた。

その結果、フレッシュペーストを水とセメント粒子とから成る2相材料とすると、セメントの品質が一定の場合には、ペーストのレオロジー構成式は、セメントの体積濃度をパラメータとして求められ、セメント体積濃度が高くなるほど降伏値、塑性粘度ともに大きくなった。

フレッシュモルタルのレオロジー定数には、ペーストの性質、細骨材の量、粒度などが影響し、ペースト中のセメント体積濃度が高くなる、細骨材量が多くなる、細骨材の粒度が細くなるほどレオロジー定数は大きくなった。モルタルをペーストと細骨材とから成る2相材料と考えた場合、モルタルのレオロジー定数に及ぼす細骨材の量および粒度の影響は、細骨材粒子の表面に付着して細骨材と一体となって流動すると考えた厚さ $10\mu\text{m}$ と仮定した付着ペースト量を、細骨材量に加えたみかけの細骨材体積濃度で表せ、これとペーストの性質を記述できるセメント体積濃度をパラメータとした構成式が求められた。

フレッシュコンクリートをモルタルと粗骨材とから成る2相材料と考え、モルタル部分のレオロジー定数で除した相対レオロジー定数すなわち相対降伏値および相対粘度は、モルタルの性質が一定の場合には、粗骨材の量、粒度および粒形の違いを表す粗骨材と一体となって流動するとした、付着モルタル量を粗骨材に加えたみかけの粗骨材体積濃度を、パラメータとして定式化できた。

一方、モルタルの性質が変化する場合には、前述のみかけの粗骨材体積濃度のみでは、コンクリートの配合要因が相対レオロジー定数に及ぼす影響を評価できず、コンクリートを水と固体粒子とから成る2相材料とし、細粗骨材に付着して一体となって挙動するとしたペーストおよびモルタル中に含まれる固定化水分量を加えたみかけの固体粒子体積濃度を

パラメータとして、レオロジー構成式が得られた。

また、プレーンのモルタルやコンクリートの降伏値と塑性粘度との間には、モルタルにおいては非常に高い、コンクリートにおいても高い相関関係があり、どちらか一方の値から他方を推定できる関係式が得られた。

以上の結果においては、

第3章で述べた3種の粘度計を用いたが、同一配合、同一材料のペーストやモルタルであっても測定装置が異なれば、レオロジー定数はかなり大きく相違することがある。また、使用材料は異なるが、ほぼ同様の配合の他の研究者によるレオロジー定数と最大10倍程度違っている場合があった。一方、レオロジー構成式を検討するためには、コンクリート中のペーストからコンクリートまでのレオロジー定数を測定しなければならないが、現在このように広い範囲の配合のレオロジー定数を測定できる装置はない。したがって、このような性能を持った装置を開発するか、適用範囲の異なる装置の重なる部分の測定値の整合性について今後検討する必要がある。

なお、本研究においては、骨材の量、粒度、粒形の違いを表すため骨材の表面積を利用したが、骨材の表面積を正確に求めるのは困難であり近似的な方法を用いても手数がかり現場向きでない。このためフレッシュコンクリートの別のレオロジーモデルを検討することを含め、コンクリートの性質に及ぼす骨材特性の影響を表すパラメータとして、実用的な粒度分布や実積率あるいは新しい指標など現場で簡便に測定できるものを用いたレオロジー構成式を検討することが今後の課題である。

第5章では、コンクリートを練り混ぜてから打込むまでの運搬時間をシミュレートした経過時間による性質変化について、初期スランプ値、単位セメント量、コンクリート温度、混和剤の種類や使用量を変え、ビンガム物体と仮定したフレッシュコンクリートの性質に及ぼす影響について実験的に検討した。

その結果、注水後の経過時間が長くなるとすべての配合、すべての条件においてスランプ値は小さくなり、従来の結果と同様の傾向を示した。しかし、コンクリート温度の違いによる影響は、ほとんどなく、既往の傾向と異なった結果となった。また、経過時間によるスランプ値の低下の大きさも、従来のものに比べてかなり大きくなった。

これは、実験室でトラックアジテータをシミュレートするために用いた改造可傾式ドラムミキサの内部でコンクリートが、自由落下した部分があったためと考えている。

経過時間によるレオロジー定数の変化は、時間が長くなるとともに大きくなったが、降伏値と塑性粘度とではその増加割合が異なり、塑性粘度の増加は、降伏値の増加の割合の約半分となった。これは、フレッシュコンクリートの主としてチクソトロピーによるものと考えられる。

混和剤を用いたコンクリートのスランプ値およびレオロジー定数の変化率は、プレーンコンクリートより大きいが、全般的な傾向はプレーンコンクリートと同様になった。これは、空気量の減少量が混和剤を用いたコンクリートでは、プレーンコンクリートに比べて大きいことが1つの大きな原因と考えられる。しかし、AEコンクリートでは、空気量の変化に見合うだけのスランプ値の低下は示されなかった。また減少剤の型の違いによる差も見られなかった。

スランプロスを低減させる効果があるといわれている混和剤は、スランプ値の低下、レオロジー定数の増加を抑え、その使用量がセメント質量の0.6~1.4の範囲では、使用量が多いほどその効果も大きく、富配合でコンクリート温度の高い方がより有効にスランプロスを低減させ、この剤の有効性が示された。

アジテーションしたコンクリートのレオロジー定数相互には、かなり高い相関関係があるが、プレーンコンクリートでアジテーションしない場合の結果よりもばらつきが大きく、その傾きも異なった。これは、アジテーションしたコンクリートの時間経過による塑性粘度の増加が降伏値よりも小さいことから説明できる。

以上の結果は、実験室でトラックアジテータによるアジテーションを改造したドラムミキサを用いてシミュレートしたもので、定性的な資料としては有効であるが、定量的な資料が必要な場合には、実際のトラックアジテータを用いた測定が必要であろう。

第6章では、現在開発されているモルタルやコンクリートのレオロジー定数の測定装置は大型でしかもその測定法も複雑であり、コンクリート工事の現場での測定には適さないのが、測定法が簡便で現在最もよく使用されているスランプ試験のレオロジー

的意義を検討した。

その結果、スランプしたコンクリートが静止していると考え、このコンクリートの内部には流動に関係するせん断応力度が発生しており、このせん断応力度の最大値がコンクリートに特有なある値を超えるとコンクリートは流動すると考えた。したがって、このときのせん断応力度の最大値は、コンクリートをビンガム物体と仮定するならば降伏値と同じ意味を持つことになる。そこで、スランプしたコンクリートの形状を実測し、これを用いてスランプ値とせん断応力度の最大値との関係を理論的に求めると、ほぼ線形となり、実験によるスランプ値と平行板プラストメータで求めた降伏値との関係は、スランプ値数cm~十数cmの範囲で線形関係が得られ、理論値ともよく一致した。

したがって、前述したようにプレーンコンクリートでは、降伏値と塑性粘度との間に高い相関関係があるので、スランプ値が数cm~十数cmのプレーンコンクリートでは、スランプ値のみでレオロジー定数をかなりの程度推定できることが示された。

最後に今後の課題として、本研究では主として混和剤を用いないプレーンコンクリートを対象としたが、現在ではほとんどの配合に混和剤を用いているので、混和剤がフレッシュコンクリートのレオロジー的性質に及ぼす影響に関する研究が必要である。また、コンクリートのワーカビリティを著者は、本研究で対象としたフレッシュコンクリートのレオロジー的性質すなわち流動性だけで表せると考えておらず、材料分離に対する抵抗性などすなわち安定性をも含んでいると解釈している。しかし、施工方法に関連して要求されるフレッシュコンクリートのかなりの部分は、このレオロジー的性質で表せると考えている。したがって、本研究で最終目的としたコンクリートの品質管理を一定の規準で行うためには、安定性について検討するとともに、フレッシュコンクリートのレオロジー的性質と構造物の形状・施工方法などに関連づけることが次の段階として必要である。

## 謝 辞

本研究を実施するにあたり、終始一貫して暖かい御指導、御鞭撻下さいました京都大学教授・岡田清博士に心から感謝致します。同時に、著者がコンクリート工学を学びはじめて以来、変らぬ御指導、御鞭撻をいただいている明石工業高等専門学校校長・荒木謙一博士ならびに徳島大学教授・河野清博士に深く感謝致します。

また、研究途上において数々の御討議、御教示をいただきその上お励まし下さいました鳥取大学教授・西林新蔵博士、岐阜大学教授・小柳治博士ならびに京都大学助教授・小林和夫博士に感謝致します。

さらに、しばしば有益な御助言、御討議をいただきました鳥取大学・矢村潔氏、明石工業高等専門学校・角田忍氏に謝意を表するとともに、実験を遂行するにあたり御協力いただきました京都大学工学部土木材料学研究室の諸氏ならびに徳島大学工学部コンクリート工学研究室の卒業生諸氏に対して感謝致します。

最後に、実験その他に御援助いただきました徳島大学・鍛冶公美技官、図面作成に御援助いただきました徳島大学助手・堀井克章氏、徳島大学大学院生・島弘氏ならびに向井恒好氏にお礼申し上げます。